

**VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

2013

Ondřej Zbořil

**VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky**

**Kónická zakončení optických vláken pro senzorové aplikace  
Conical Termination of Optical Fibers for Sensor Applications**

**2013**

**Bc. Ondřej Zbořil**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Ondřej Zbořil**

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Kónická zakončení optických vláken pro senzorové aplikace  
Conical Termination of Optical Fibers for Sensor Applications

Zásady pro vypracování:

Kónická zakončení hrají významnou úlohu při navázání a vyvázání světla z optických vláken. Mají rovněž velký význam pro vláknově optické senzory s evanescentními vlnami. V diplomové práci

1. Realizujte kónická zakončení na různých typech vláken pomocí svářečky optických vláken Fujikura.
2. Změřte geometrii kónických zakončení a stanovte velikosti útlumu kónických profilů
3. Vyhodnoťte statistické parametry měřených souborů geometrických parametrů a optického útlumu

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] Yin, S., Ruffin, P.B., Yu, F.T.S.: Fiber Optic Sensors. CRC Press, FL, USA, 2008, ISBN 978-1-4200-5365-4  
[2] Morse, T.F., Mendez, A.: Specialty Optical Fibers - Handbook. Academia Press, San Diego, 2007, ISBN 978-0-12-369406-5

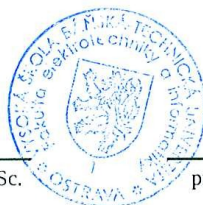
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.**

Datum zadání: 18.11.2011

Datum odevzdání: 07.05.2013

  
prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě .....  
7.5.2013

.....  


Ondřej Zbořil

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo,
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3),
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO,
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě ..... 7.5.2013

..... 

Ondřej Zbořil

Jméno a příjmení autora práce:

Adresa trvalého bydliště autora práce:

## Poděkování

Rád bych poděkoval prof. RNDr. Vladimíru Vašínkovi, CSc. za odbornou pomoc a konzultace při vytváření této diplomové práce.

## **Anotace diplomové práce**

ZBOŘIL, Ondřej. *Kónická zakončení optických vláken pro senzorové aplikace : diplomová práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektroniky a informatiky, Katedra telekomunikační techniky, 2013, 68 s. Vedoucí práce: Vašínek, Vladimír.

**Abstrakt:** Cílem této diplomové práce je realizace kónických zakončení na optických vláknech a popis jejich tvarů pro vyhodnocení reprodukovatelnosti kónických zakončení. V teoretické části je čtenář nejprve uveden do problematiky optických vláken a jejich možného využití pro senzorické aplikace. Jelikož mají být kónická zakončení utvářena pomocí svářečky Fujikura, tak je tu i kapitola věnující se svařování optických vláken a jejich tažení. Po této teoretické části je popisován postup jednotlivých měření. Následují grafy s tabulkami obsahujícími naměřené hodnoty. Výsledek práce je shrnut v závěru.

**Klíčové slova:** Optické vlákno, svářečka optických vláken, jádro, plášť, tapering, kónické zakončení, útlum, ztráty.

## **Annotation of Master Thesis**

ZBOŘIL, Ondřej. *Conical Termination of Optical Fibers for Sensor Applications : Master Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Department of Telecommunications, 2013, 68 p. Thesis head: Vašínek, Vladimír.

**Abstract:** As the very goal of this Graduation Theses I would specify the Realization of the conical termination of the optical fibres and the description of their very own shapes for the exact evaluation of reproduction of the conical termination. There is a theoretical part where the reader is going to be attracted to a problematic of the optical fibres and to the opportunity of their usage for the sensoric applications. As long as the conical termination have to be crafted by Fujikura the fusion splicer, there is also a chapter focusing on splicing of optical fibres and their drawing. After this theoretical part we can find here, in this very Graduation theses, a described progression of every single measurement followed by the graphs containing sheets with a measured values. Accomplishment and results are included in the epilogue (at the end) of this very these.

**Keywords:** Optical Fiber, Fusion Splicer, Core, Cladding, Tapering, Conical Termination, Attenuation, Loss.

## Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
$\alpha$	°	Úhel šíření
$\alpha_m$	°	Mezní úhel šíření
$\theta$	°	Příjmový úhel
$\lambda$	m	Vlnová délka
$i$	°	Úhel přiváděného paprsku
$i_m$	°	Mezní příjmový úhel
$l_1$	-	Klasická část optického vlákna
$l_2$	-	Přechod do zúžené části vlákna
$l_3$	-	Pas – zúžená část vlákna
$n$	-	Index lomu
$P$	W	Optický výkon
$V$	-	Normalizovaná frekvence



## Seznam použitých zkratk

Zkratka	Anglický význam	Český význam
GI	Gradient refractive index	Gradientní index lomu
MMF	Multi Mode Fiber	Mnohovidové vlákno
NA	Numerical aperture	Numerická apertura
OTDR	Optical Time Domain Reflectometry	Optická reflektometrie v časové oblasti
PMF	Polarization Maintaining Fiber	Polarizační vlákno
SI	Step index	Skokový index lomu
SMF	Single Mode Fiber	Jednovidové vlákno

# Obsah

1	Úvod.....	1
2	Optická vlákna.....	2
2.1	Úvod do problematiky.....	2
2.2	Charakteristika a princip optických vláken .....	3
2.3	Numerická apertura optických vláken.....	7
2.4	Základní druhy optických vláken .....	7
2.4.1	Jednovidová optická vlákna – Single Mode (SM).....	8
2.4.2	Mnohovidová optická vlákna – Multi Mode (MM) .....	11
2.4.3	Skokový průběh indexu lomu – Step Index (SI) .....	11
2.4.4	Gradientní průběh indexu lomu – Gradient Index (GI) .....	12
2.4.5	Vlákna pro speciální účely .....	12
2.5	Metody spojování optických vláken.....	13
2.5.1	Spojování optických vláken mechanickou spojkou.....	13
2.5.2	Spojování optických vláken optickým konektorem .....	14
2.5.3	Spojování optických vláken svařováním .....	15
2.6	Kónicky zúžená optická vlákna (Tapery).....	15
2.6.1	Využití vláknové senzoriky .....	16
3	Disperze.....	17
4	Ztráty na optických vláknech .....	19
4.1	Ohybové ztráty .....	19
4.2	Absorpce.....	20
4.3	Rozptyl světla .....	20
4.3.1	Lineární.....	20
4.3.2	Nelineární .....	21
4.4	Útlum optických vláken .....	21
4.5	Metody měření útlumu na optických vláknech .....	22
4.5.1	Metoda dvou délek .....	22

4.5.2	Metoda vložných ztrát .....	23
4.5.3	Metoda substituční.....	24
4.5.4	Metoda zpětného rozptylu (OTDR).....	25
5	Vláknové senzory .....	27
5.1	Dělení vláknových senzorů dle měřené veličiny .....	27
5.2	Dělení vláknových senzorů dle rozložení detekční části .....	28
5.3	Dělení vláknových senzorů dle povahy převodu měřené veličiny .....	30
5.4	Senzor s evanescentní vlnou.....	30
5.4.1	Optické vlákno s odstraněnou částí pláště .....	30
5.4.2	Speciální vlákna s nekruhovými průřezy .....	31
5.4.3	Mikrostrukturní optická vlákna - MOF .....	32
5.4.4	Kónicky zúžená vlákna – tapery.....	32
6	Svařování.....	34
6.1	Princip svařování optických vláken.....	35
6.2	Popis svářečky .....	36
6.3	Měření útlumu svaru .....	36
6.3.1	Vyhodnocení útlumu svaru pomocí svářečky.....	36
6.3.2	Metoda zpětného rozptylu (OTDR).....	38
6.4	Tapering.....	40
7	Postup měření .....	42
7.1	Měření geometrie kónických zakončení.....	42
7.2	Měření velikosti útlumu kónických profilů.....	45
7.3	Nastavení svářečky .....	46
8	Výsledky měření.....	49
8.1	Naměřená geometrie kónických zakončení.....	49
8.1.1	Geometrie na kónických zakončeních jednovidových vláken.....	49
8.1.2	Geometrie na kónických zakončeních mnohovidových vláken .....	52
8.2	Naměřený útlum na kónických profilech .....	55

8.2.1	Útlum na jednovidových vláknech .....	55
8.2.2	Útlum na mnohovidových vláknech.....	57
9	Statistika měření .....	58
9.1	Vyhodnocení geometrických parametrů jednovidových vláken .....	58
9.2	Vyhodnocení geometrických parametrů mnohovidových vláken .....	60
9.3	Vyhodnocení optického útlumu na jednovidových taperech .....	62
9.4	Vyhodnocení optického útlumu na mnohovidových taperech .....	63
10	Zhodnocení a závěr .....	65
11	Odkazy a literatura .....	66
12	Seznam příloh.....	68

---

# 1 Úvod

Tato diplomová práce seznámí čtenáře s tematikou optických vláken a jejich svařováním a vytvářením kónických zakončení. Nejprve si optická vlákna vydobyla místo nejvýznamnějšího telekomunikačního média pro vysokorychlostní přenos, disponující řadou výhod oproti metalickým spojům, ať už jde o mnohonásobně vyšší přenosové rychlosti, imunitu vůči elektromagnetickému rušení a odposlechu, či v neposlední řadě daleko menším nárokům na prostor. V posledních letech se optická vlákna stále častěji používají v oblastech senzoriky.

Dnes existuje obrovská škála optických vláknových senzorů, které dokážou měřit velkou část fyzikálních veličin. Tyto vláknové senzory využívají pro svoji činnost nejrozumnějších vnějších vlivů, které působí na vlákno a tím tak ovlivňují modulaci optického záření, která je následně vhodným způsobem vyhodnocována.

První část této práce vysvětluje funkci optických vláken, popisuje jejich typické vlastnosti a rozdělení. Druhá část je zaměřena na ztráty v optickém vlákně a metody řešení těchto ztrát. Poslední teoretická část pojednává o samotném svařování optických vláken a následném vyhodnocování útlumu na svaru. V této části bude vysvětlena metoda kónického zakončování (dále jen taperování) optických vláken, díky které mohou být tvořeny kónické spoje, jež jsou náplní této diplomové práce. Po teoretické části následuje část praktická, která začíná popisem postupu jednotlivých měření a za ní následuje část věnující se výsledkům měření. Série taperů je porovnána dle geometrických parametrů ve statistické části společně s hodnotami útlumu. Lze zde vidět reprodukovatelnost zúžených svarů při určitém nastavení. Celá diplomová práce je zakončena závěrem, v němž jsou shrnuty a zhodnoceny výsledky a nejpodstatnější poznatky zjištěné během celého měření.

---

## 2 Optická vlákna

Tato kapitola se věnuje optickým vláknům, principům jejich činnosti a popisuje navázání světelného paprsku do optického vlákna. Je zde uvedeno dělení vláken a pak také metody jejich spojování. Kapitola je završena popisem kónických tvarů na optickém vlákně.

### 2.1 Úvod do problematiky

První optické vlákno tvořené jádrem a pláštěm bylo představeno v roce 1954 Abrahamem Van Heelem. Pracovníci britské firmy „Standart Telecommunication Laboratory“ v roce 1966 předpověděli, že velké ztráty na optických vláknech jsou zapříčiněny především nečistotami. V té době dosahovala nejčistější skla používaná v optice útlumu kolem  $1000 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ , což je pro telekomunikační provoz prakticky nepoužitelné. Americká firma „Corning Glass Works“ v roce 1970 vyvinula na základě práce dr. Charlese H. Kaoa způsob, jak produkovat nízkoútlumová optická vlákna. První použitelná optická vlákna měla útlum kolem  $20 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$  a ten se neustále zmenšoval až k dnešním  $0,2 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ . V roce 1977 se podařilo zprovoznit první optický telekomunikační spoj, který byl komerčně využíván. [1]

Průměr optického vlákna bývá v řádu desítek a stovek mikrometrů. Součástí optického kabelu bývá jedno nebo více vláken. Pokud se např. při budování sítí v budově použijí optická vlákna, ušetří se tímto mnoho prostoru i váhy v kabelovém vedení, jelikož jedno tenké optické vlákno dovoluje mnohonásobně větší přenosovou rychlost, než jakých je možno dosáhnout na tlustějším metalickém vedení a přitom je samo velmi lehké. [2]

Optická vlákna jsou zároveň součástí optického komunikačního systému, která nejvíce ovlivní jeho samotné parametry. Optická vlákna slouží společně s dalšími součástkami k vybudování kabelové trasy, která tvoří optickou kabelovou síť. Optická kabelová trasa bývá na obou koncích opatřena konektory, pomocí kterých je zpravidla připojena na další komunikační zařízení, ať už je to zdroj optického signálu, fotodetektor nebo nějaký jiný komunikační systém. Analýza šíření signálu skrze optické vlákno je mnohem složitější, než je tomu u klasických metalických vlnovodů. [2]

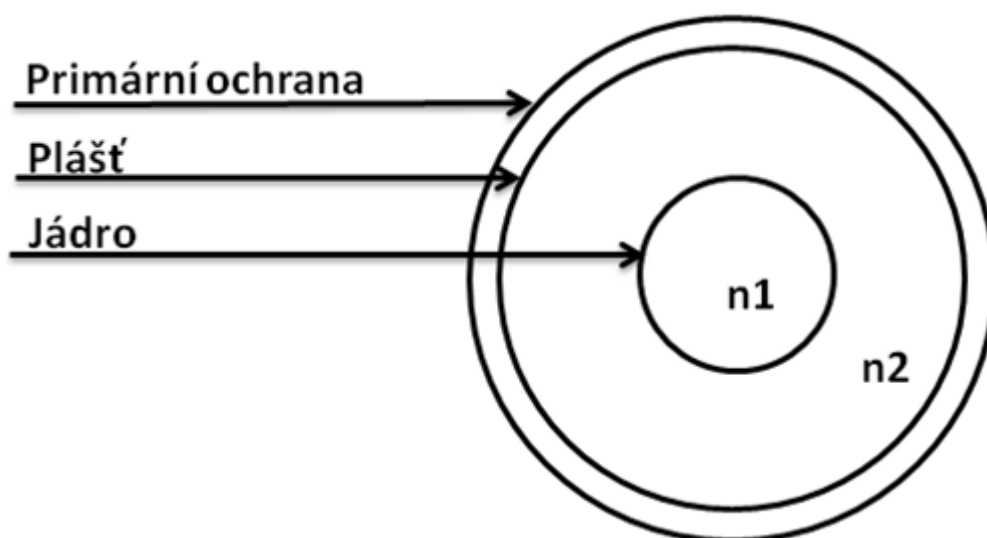
I přes veškeré úspěchy optických komunikací, které zatím přinesly, má tato technologie své plné využití určitě teprve před sebou. Optické sdělovací systémy jsou propojeny s pomalými elektronickými sdělovacími systémy, a tím je potenciál této technologie značně degradován. K plnému využití tohoto potenciálu dojde v okamžiku, kdy budou současné fungující metalické sítě plně nahrazeny optickými systémy – tomuto problému se obvykle říká „elektronová bariéra“. [1]

---

Neustálá potřeba rychlejšího a spolehlivějšího telekomunikačního spojení vedla k rychlému vývoji na poli optických sítí v posledních desetiletích. V posledních letech se optická vlákna stále hojněji využívají jako senzory pro měření nejrůznějších typů veličin. Některá měření lze provádět s konvenčními vlákny, jiné metody vyžadují použití speciálních vláken k tomu účelu vytvořených.

## 2.2 Charakteristika a princip optických vláken

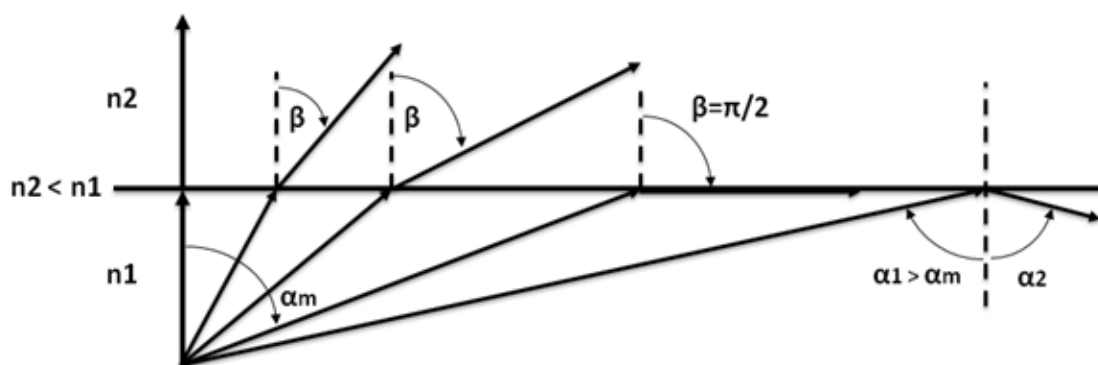
Optické vlákno je dielektrický vlnovod šířící elektromagnetické vlny ve směru osy vlákna, které bývá vyrobeno s různých druhů skla nebo plastu. Tyto vlnovody jsou jako jediné vhodné k přenosu optického signálu na větší vzdálenosti. Používají se místo metalických vodičů kvůli jejich menším ztrátám na větší vzdálenosti, rozměrům, váze a také jsou imunní vůči elektromagnetickému rušení. Optické vlákno bývá nejčastěji tvořeno jádrem s indexem lomu  $n_1$ , které je obaleno pláštěm o indexu lomu  $n_2$  a případně i primární ochrannou vrstvou, jak je zobrazeno na obrázku 2.1. [2]



**Obr. 2.1:** Struktura optického vlákna [2][3]

Princip funkce optického vlákna je založen na úplném vnitřním odrazu optického signálu na rozhraní dvou optických prostředí s rozdílným indexem lomu. Pokud světlo pohybující se v opticky hustším prostředí dopadne na rozhraní dvou materiálů pod úhlem, bude odraženo zpět do původního prostředí. Tímto je světelný paprsek udržen uvnitř vlákna. Hodnota indexu lomu daného prostředí udává vliv prostředí na rychlost světla v něm se pohybujícím. Index lomu jádra  $n_1$  musí být větší než

index lomu pláště  $n_2$ , aby se paprsek z vlákna nevyvázal. Čím je hodnota indexu lomu větší, tím pomaleji se světlo pohybuje v daném prostředí. Opticky hustší prostředí je s větším indexem lomu. Světlo se pohybuje nejrychleji ve vakuu, to má index lomu 1. Lom světla je znázorněn na obrázku 2.2. [1][3][4]



**Obr. 2.2:** Lom světla [3]

Paprsek dopadající na rozhraní s opticky řidším prostředím se chová následovně:

- Pokud je úhel dopadu vzhledem ke kolmici rozhraní menší než je mezní úhel  $\alpha_m$ , paprsek projde rozhraním do optického prostředí  $n_2$  a láme se od kolmice roviny dopadu. Odraz může být jen částečný a část paprsku se vrací zpět do opticky hustějšího prostředí  $n_1$ . [3]
- Při dosažení mezního úhlu  $\alpha_m$  již nedochází k šíření v prostředí  $n_2$ . Pokud  $\alpha_i = \alpha_m$ , pak po odrazu se paprsek šíří na rozhraní  $n_1$  a  $n_2$ . Výpočet mezního úhlu se provádí podle vzorce (1). [3]

$$\sin \alpha_m = \frac{n_1}{n_2} \quad (1)$$

Výpočet sinu mezního úhlu [3]

Kde:

$\alpha_m$  je mezní úhel; [ $^\circ$ ]

$n_1$  je index lomu jádra; [-]

$n_2$  je index lomu pláště; [-]



- Pokud je úhel dopadajícího paprsku  $\alpha_1$  větší než mezní úhel  $\alpha_m$ , je téměř celá energie paprsku odražena pod úhlem  $\alpha_2$  zpět do původního optického prostředí  $n_1$ . Tento případ je využíván pro přenos signálu optickými vlákny a je popsán Snellovým zákonem (2). [3]

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

Snellův zákon [2]

Kde:

$\alpha_1$  je úhel šíření v prostředí s indexem lomu  $n_1$ ; [°]

$\alpha_2$  je úhel šíření v prostředí s indexem lomu  $n_2$ ; [°]

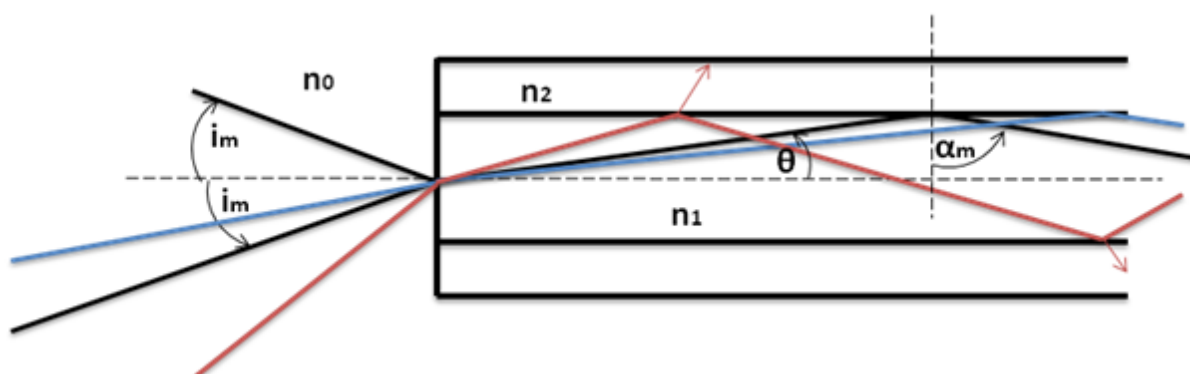
$v_1$  je rychlost šíření paprsku v daném prostředí; [m/s]

$v_2$  je rychlost šíření paprsku v daném prostředí; [m/s]

$n_1$  je index lomu daného prostředí; [-]

$n_2$  je index lomu daného prostředí; [-]

Mezní příjmový úhel  $i_m$  vymezuje na vstupu optického vlákna vstupní kužel, ve kterém musí dopadat paprsek, aby byl vláknem úspěšně zachycen a veden. Navázání světelného paprsku do optického vlákna je znázorněno na obrázku 2.3 a popsáno upraveným Snellovým zákonem (3). Je to velmi důležitý parametr optického vlákna, na kterém závisí způsob propojování prvků optického komunikačního systému. [1][2][3]



**Obr. 2.3:** Navázání světelného paprsku do optického vlákna [3]

---


$$\frac{\sin i}{\sin \theta} = \frac{n_1}{n_0} \quad (3)$$

Pro rozhraní vnějšího prostředí a jádra vlákna [1]

Kde:

$i$  je úhel přiváděného paprsku; [°]

$\theta$  je příjmový úhel; [°]

$n_0$  je index lomu vnějšího prostředí; [-]

$n_1$  je index lomu jádra; [-]

- Je-li světelný paprsek do optického vlákna přiváděn pod úhlem menším než je mezní příjmový úhel  $i_m$ , je splněna podmínka  $\alpha_1 > \alpha_m$  pro navázání paprsku do vlákna a ten se dále na rozhraní jádra a pláště odráží zpět do jádra po celé délce optického vlákna, kde se uplatňuje princip totálního odrazu (4). [2][3]

$$\sin \alpha (= \cos \theta) > \frac{n_2}{n_1} \quad (4)$$

Výpočet mezního úhlu šíření uvnitř vlákna [3]

Kde:

$\alpha$  je úhel šíření v prostředí; [°]

$\theta$  je příjmový úhel; [°]

$n_1$  je index lomu jádra; [-]

$n_2$  je index lomu pláště; [-]

- Pokud je paprsek přiváděn pod větším úhlem nežli je mezní příjmový úhel  $i_m$ , je  $\alpha_1 < \alpha_m$  a paprsek s každým odrazem na rozhraní jádra a pláště ztrácí část energie, která projde pláštěm. [2][3]

---

## 2.3 Numerická apertura optických vláken

Jedná se o parametr optického vlákna, jenž je udán vzorcem (5) a značí se  $NA$ . Není to vyloženě přenosový parametr, ale umožňuje nám udělat si přehled o možnostech navázání světelného paprsku do optického vlákna a zjistit charakteristiku buzení tohoto vlákna. Je udána přímo výrobcem vlákna, jelikož závisí na indexech lomu jádra a pláště vlnovodu. Numerická apertura vymezuje vstupní kužel na vstupu optického vlákna a u toho vychází se sinu příjmového úhlu  $\theta_0$ . [1][2]

$$NA = n_0 \cdot \sin \theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (5)$$

Výpočet numerické apertury [1]

Kde:

$NA$  je numerická apertura; [-]

$n_0$  je index lomu prostředí, z kterého vstupuje paprsek; [-]

$n_1$  je index lomu jádra; [-]

$n_2$  je index lomu pláště; [-]

$\theta_0$  je příjmový úhel dopadajícího paprsku; [°]

## 2.4 Základní druhy optických vláken

Používá se několik druhů optických vláken a ty se dají rozlišovat podle různých parametrů. Z pohledu počtu vedených paprsků (světelných vln) můžeme optická vlákna rozdělit na dvě skupiny:

- Jednovidová vlákna
- Mnohovidová vlákna

Nejvýznamnější rozdíl mezi těmito vlákny je ten, zdali je optické vlákno určeno pro přenos jednoho vidu či vícero vidů. Jeden vid (také mód) odpovídá jednomu optickému paprsku uvnitř vlnovodu. V rámci elektromagnetické optiky se dá na vidy ve vláknech dívat jako na ustálenou elektromagnetickou konfiguraci [1].

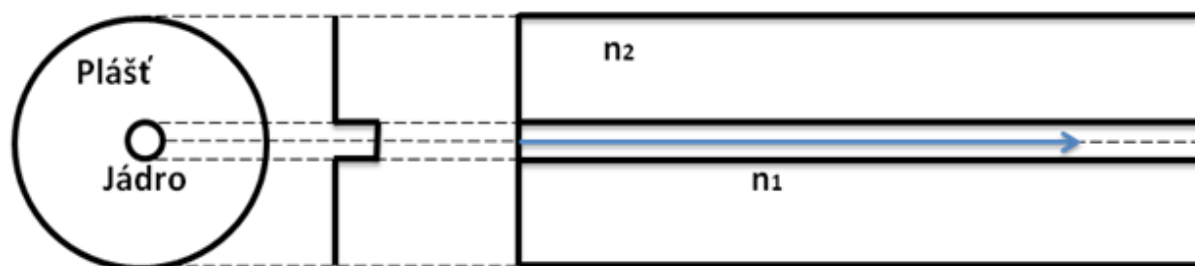
Mezi základní parametry optických vláken patří jeho přenosové vlastnosti, které jsou pak zásadně ovlivněny disperzí a útlumem. Tyto přenosové vlastnosti vláknových vlnovodů můžeme do značné míry ovlivňovat jejich konstrukčními parametry. Hlavními konstrukčními parametry optických vláken jsou jejich příčné rozměry a rozložení indexu lomu materiálu průřezem. Bylo vytvořeno mnoho druhů vláknových vlnovodů s nejrůznějšími přenosovými vlastnostmi. Obecně je můžeme rozdělit dle průběhu indexu lomu v závislosti na poloměru  $r$  na vlákna tvořena jednou či více vrstvami homogenního dielektrika a na vlákna s plynule proměnným indexem lomu. Oba tyto základní typy vlnovodů se od sebe liší mimo jiné mechanismem šíření energie:

- Skokový průběh indexu lomu
- Gradientní průběh indexu lomu

Dále se vlákna dělí a třídí podle mnoha parametrů jako geometrické rozměry, složení materiálu atp. Standardně se v optických systémech využívá křemenné optické vlákno, pro menší vzdálenosti potom stačí plastové. Dále je zde řada atypických vláken s různým složením a provedením, která se mohou lišit rozdílnými vlastnostmi, využitím a samozřejmě i cenou. [1][4]

#### 2.4.1 Jednovidová optická vlákna – Single Mode (SM)

Tato vlákna se používají především na dálkové přenosy, kde se uplatní jejich vysoké přenosové rychlosti a velká šířka pásma. Dosahují menšího útlumu než vlákna mnohovidová a tak jsou schopné překonat až 100 km vzdálenosti bez použití opakovací. S použitím opakovacích se tato vzdálenost mnohonásobně zvětšuje. Nevyskytuje se na nich vidová disperze, ale projevuje se disperze chromatická a polarizační vidová. Numerická apertura je na jednovidových vláknech nižší, a proto je jejich použití nákladnější, především kvůli nutnosti drahých optických zdrojů, které jsou charakterizovány vysokou směrovostí. Mívají daleko menší průměr jádra než vlákna mnohovidová (řádově jednotky mikrometrů). Profil jednovidového optického vlákna je znázorněn na obrázku 2.4. Přehled typů vláken dle doporučení ITU-T je uveden v tabulce č. 2.1. [1][2][8][12][13]



Obr. 2.4: Profil jednovidového optického vlákna [1]

---

Pro jednovidový režim je nutno dodržet následující podmínku vypočítanou z řešení vlnové rovnice, která vede na Besselovské funkce (6):

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot NA \leq 2,405 \quad (6)$$

Podmínka pro zachování jednovidového režimu [1]

Kde:

$V$  je normalizovaná frekvence; [-]

$\lambda$  je vlnová délka; [m]

$a$  je poloměr jádra vlákna; [m]

$NA$  je numerická apertura; [-]

Tradičně se používají se dvě vlnové délky:

**1310 nm** – sklo zde dosahuje nejmenších hodnot disperze

**1550 nm** – sklo zde dosahuje nejmenších hodnot útlumu

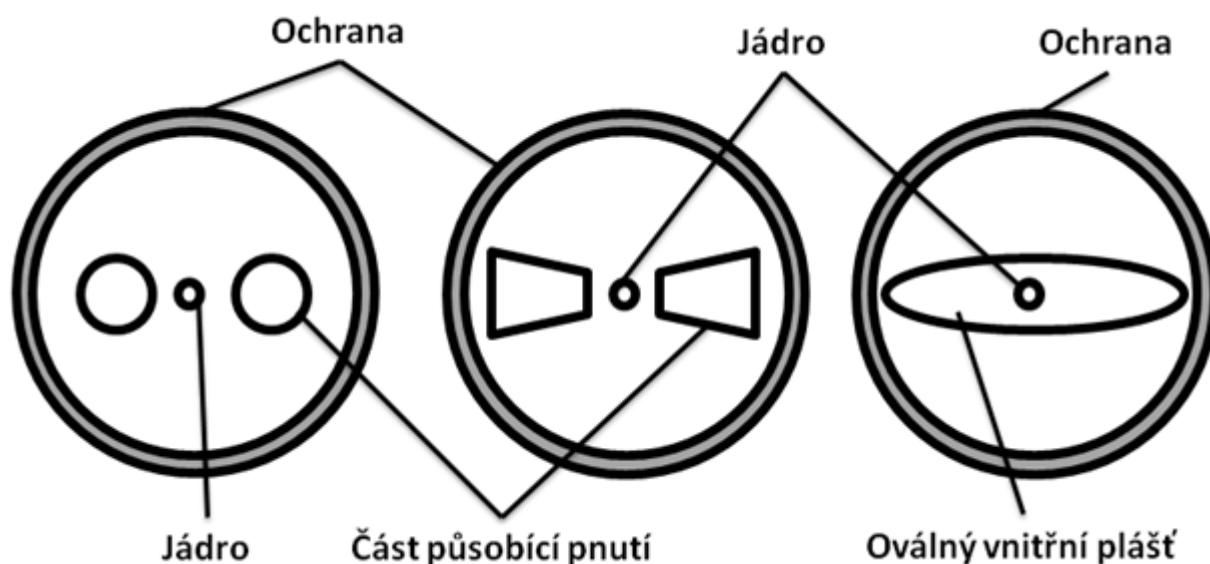
**Tabulka č. 2.1:** Doporučení ITU-T pro jednovidová vlákna [8][12][13]

Doporučení ITU	Typ Vlákn
<b>G.652</b>	Konvenční jednovidové vlákno (NDSF – Non Dispersion Shifted Fiber) s nulovou disperzí v okolí 1310 nm
<b>G.653</b>	S posunutou disperzní charakteristikou (DSF – Dispersion Shifted Fiber), nulová disperze v okolí 1550 nm
<b>G.654</b>	S minimálním útlumem v pracovní oblasti, vhodné pro dálkové přenosy bez opakovačů
<b>G.655</b>	S nenulovou posunutou disperzí (NZ-DSF – Non Zero Dispersion Shifted Fiber), disperze je v mezích i při rychlostech 10 Gbit/s
<b>G.655B</b>	S rozšířenou částí nulové disperze (A-NZDSF – Advanced Non Zero Dispersion Shifted Fiber)
<b>G.657</b>	S nižší úrovní útlumu způsobeným ohnutím vlákna - zpětně kompatibilní s G.652
<b>G.657B</b>	Není zpětně kompatibilní s ostatními vlákny, ale disponuje jedinečnými mechanickými vlastnostmi

---

- Polarizační vlákna – Polarization Maintaining Fiber (PMF)

Jednovidové vlákno s ideální symetrií by dokázalo udržet jakýkoliv typ polarizace, pokud by však na vlákno působil tlak, dojde k narušení symetrie – vzniká tak dvojlom, při kterém se zvýrazní x-ové nebo y-ové složky paprsků. Pokud optickým vláknem postupuje přirozené světlo, lze se na toto světlo dívat jako na dva vzájemně kolmé polarizační stavy. Pro polarizační vlákna je typické, že podporují pouze jeden polarizační stav. Obecně lze optický pulz ve vlákně rozdělit na dvě pravoúhlé složky, které se šíří podél jedné z os. Tyto dvě osy se vytváří buď změnou tvaru vlákna na oválný profil, nebo zajištěním tlaku na jádro. Díky tomu jsou tato vlákna schopná udržet lineární polarizaci procházejícího paprsku vláknem. Polarizační vlákna se vyrábějí nejčastěji v provedeních Panda, motýlek případně s elipticky rozloženým pláštěm, jak je zobrazeno na obrázku 2.5. [4][8][12]



**Obr. 2.5:** Typy PM vláken – Panda, motýlek a s oválným pláštěm [4][12]

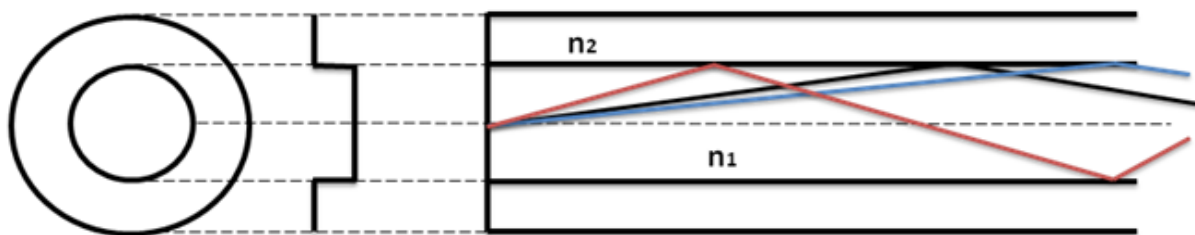
---

### 2.4.2 Mnohovidová optická vlákna – Multi Mode (MM)

U mnohovidových optických vláken zpravidla předpokládáme současné šíření více vidů. Tato vlákna mají většinou průměr jádra kolem 50 – 62,5  $\mu\text{m}$ . MM vlákna dosahují většího útlumu než SM vlákna. Hlavním faktorem omezujícím přenosové rychlosti je disperze, u mnohovidových vlnovodů zvláště pak disperze vidová, která má za následek rozdílné rychlosti šíření jednotlivých vidů ve vlákně při delších trasách. Proto se využívají především při budování optické trasy uvnitř budovy popř. areálu. Mnohovidová vlákna mohou mít index lomu jak skokový, tak i gradientní. Numerická apertura na MM vláknech dosahuje větší hodnoty a je tak snadnější navázat optický paprsek do jádra – není nutné používat laserovou diodu, protože k buzení postačí i LED dioda. [1][2][12]

### 2.4.3 Skokový průběh indexu lomu – Step Index (SI)

Jedná se o starší typ vlákna na bázi skla ( $\text{SiO}_2$ ) či průhledných polymerů, jehož výroba je levná a relativně snadná. U SI vlnovodů se energie šíří pomocí odrazu na rozhraní jádro-plášť, jak lze vidět na obrázku 2.6. Tato technologie může být využita při výrobě jednovidových vláken ale i vláken mnohovidových. Mnohovidová se používají pouze na kratší úseky, kde se neprovozuje vysoká přenosová rychlost, neboť tato vlákna jsou poznamenána vidovou disperzí. Světelný pulz ve vlákně je tvořen několika vidy, kdy se každý vid kvůli odlišné trajektorii šíří dále vláknem jinou skupinovou rychlostí a tím působí problémy při následné detekci vlivem časového rozšíření pulsu.

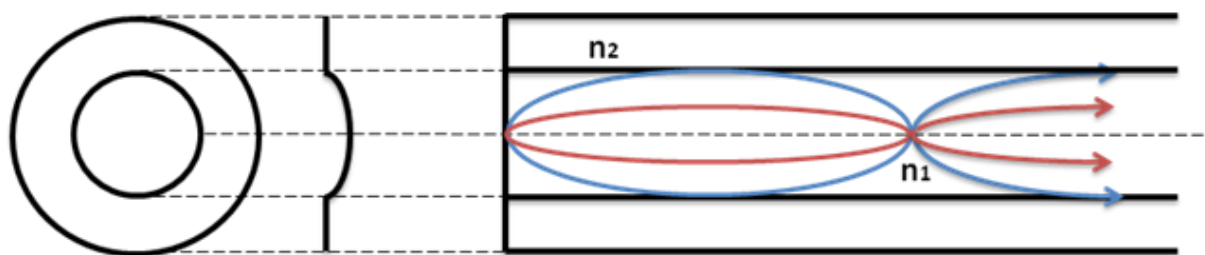


**Obr. 2.6:** Profil vlákna se skokovým indexem lomu

---

#### 2.4.4 Gradientní průběh indexu lomu – Gradient Index (GI)

Gradientní typ vlákna má oblast jádra nehomogenní, s nejčastější závislostí indexu lomu blízkou parabolické. Skládá se z více vrstev s rozdílným indexem lomu a procházející paprsek tak kopíruje průběh sinusoidy, v podstatě zde není jasné rozhraní mezi pláštěm a jádrem. Je označován jako optický vlnovod se spojitě proměnným indexem lomu, též vlnovod gradientní, označen jako GI (gradient – index). U GI vláken se energie nešíří pomocí totálního odrazu na rozhraní, ale šíří pomocí zakřivené trajektorie optických paprsků. Výroba gradientních vláken je technologicky i finančně náročnější, ale GI vlákna zásadně potlačují vidovou disperzi. Vid s nejkratší trajektorií má pomalejší skupinovou rychlost, jelikož je ve středu jádra větší index lomu. Vid s nejdelší trajektorií střídá oblasti s větším a menším indexem lomu a proto má větší skupinovou rychlost. Oproti jednovidovým vláknům zde není kladen takový důraz na přesnost při jejich spojování. Profil gradientního vlákna je zobrazen na obrázku 2.7. [1][2]



**Obr. 2.7:** Profil vlákna s gradientním indexem lomu [1]

#### 2.4.5 Vlákná pro speciální účely

Některá vlákna mají zcela atypickou konstrukci a jsou vytvářena pro speciální účely, kde konvenční optická vlákna nemají požadované vlastnosti.



---

## 2.5 Metody spojování optických vláken

Při spojování optických vláken se musí dodržovat určité zásady. Konce optických vláken musí být připraveny pro takovou aplikaci. Při nepřesném spojování vláken nebo při spojování rozdílných průřezů dochází k vazebním ztrátám. Optická vlákna lze spojovat různými metodami. Volba metody spojení vláken závisí na způsobu jejich využití. [14]

Dělení metod je následující:

- Rozebíratelné spoje
  - Mechanická spojka
  - Optický konektor
- Nerozebíratelné spoje
  - Svar

### 2.5.1 Spojování optických vláken mechanickou spojkou

Jedná se o rozebíratelný spoj, který potřebuje k správné funkci pečlivě upravené konce obou vláken, stejně jako při svařování. Hodnota vložného útlumu na mechanické spojce se pohybuje kolem 0,2 – 0,4 dB. Montáž mechanické spojky trvá kolem minuty a některé typy potřebují speciální přípravky na uzavření spojky. Některé typy spojek využívají gel, který je umístěn mezi protilehlými konci optických vláken. Tento gel má index lomu velmi blízký sklu a snižuje tak vzniklý útlum na spojce. Příklad mechanické spojky je na obrázku č. 2.8. [1][14]



**Obr. 2.8:** Mechanická spojka Fibrlok

## 2.5.2 Spojování optických vláken optickým konektorem

Spojení optickým konektorem se používá u téměř všech přístrojů pracujících s vláknovou optikou. Tento způsob spojování vláken umožňuje opakované spojování a rozpojování bez nutnosti jakéhokoliv dalšího zařízení či přípravku. Vložený útlum bývá u optických konektorů kolem 0,15 – 1,5 dB, dle typu. Na trhu je celá řada optických konektorů, na obrázku č. 2.9 je zobrazena část používaných typů. [1][14][15]



**Obr. 2.9:** Různé typy konektorů pro optická vlákna [15]

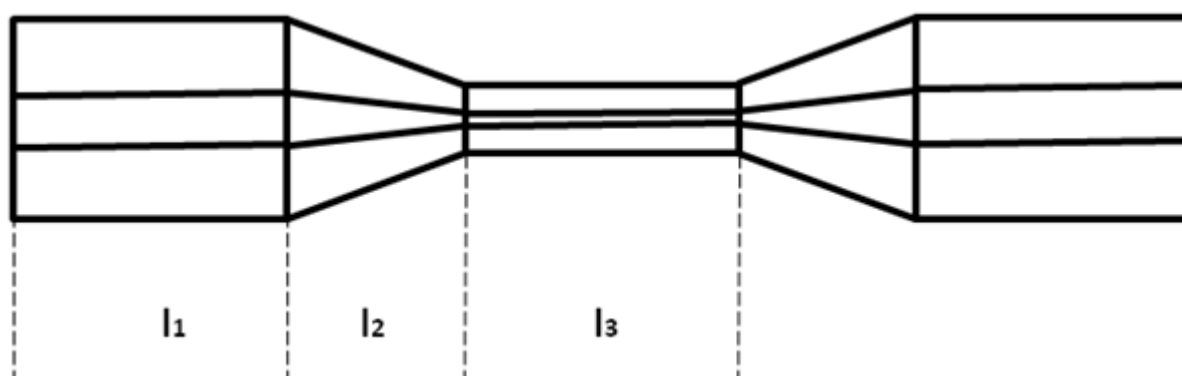
---

### 2.5.3 Spojování optických vláken svařováním

Metoda spojování vláken svařováním je nerozebíratelná. Ke svařování se používá speciální svářečka optických vláken. Jedná se o nejspolehlivější metodu spojení konců vláken. Hodnota útlumu klasického svaru se pohybuje v řádech setin dB. Velice nízké hodnoty útlumu tuto metodu předurčují ke spojování tras na dlouhé vzdálenosti. [1][14]

## 2.6 Kónicky zúžená optická vlákna (Tapering)

Taperovaná vlákna mají část profilu zúženou. Dochází k tomu tažením optického vlákna, například v horké zóně tažící pece. V případě této diplomové práce docházelo k tvarování tažením dvou protilehlých konců optických vláken od sebe v průběhu svařování. Příklad zúžené struktury je uveden na obrázku 2.10. [6][9]



**Obr. 2.10:** Profil taperovaného vlákna [10]

Zúžené vlákno by se dalo rozdělit na tři části:

- $l_1$  – první část je klasické vlákno, většinou o průměru 125  $\mu\text{m}$
- $l_2$  – část s měnícím se průměrem vlákna se jmenuje přechod
- $l_3$  – centrální část zúženého vlákna se nazývá pas

---

Zúžená část optického vlákna je zajímavá pro vláknovou sensoriku, kde se dá experimentovat s uplatněním takovýchto tvarů. Především pak jde o vláknové senzory s evanescentní vlnou případně senzory pracující s vyvázáním optického paprsku. Čím jsou pasy tenčí, tím lepší je přístup evanescentní vlny k analytu. [10][11]

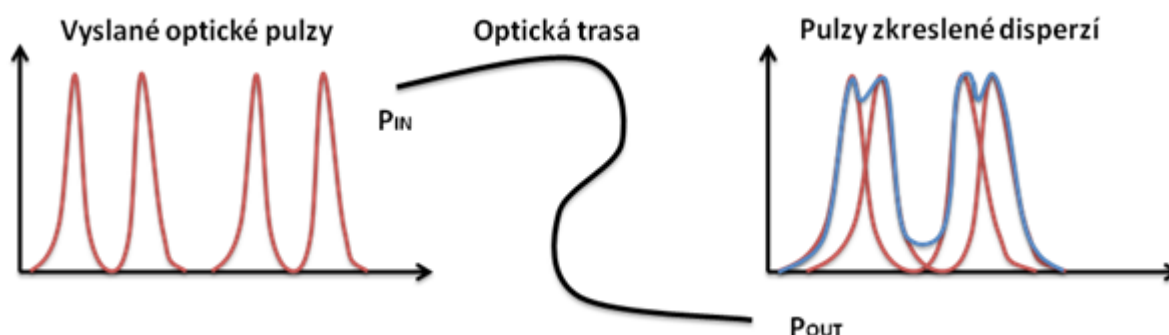
### 2.6.1 Využití vláknové sensoriky

Vláknové senzory jsou v poslední době stále populárnější a možnosti jejich využití se pořád rozšiřují. Vláknový senzor dokáže detekovat fyzikální i chemické veličiny (teplota, tlak, otřesy, přítomnost a koncentrace určitých chemických složek atp.) a jejich změny. Díky své velikosti, váze, nízkým energetickým nárokům a odolnosti vůči elektrickým i magnetickým polím nalézá tato metoda široké uplatnění. Sensorické vláknové aplikace nalézají uplatnění i v netradičních oborech jako například ve stavitelství, v čističkách odpadních vod či v biochemickém průmyslu a často nahrazují klasické metody měření daných veličin. [11]

---

### 3 Disperze

Disperze je jev, který zapříčiňuje časové zkreslení přenášeného signálu jeho časovým rozšířením, omezuje maximální možnou přenosovou rychlost, tedy nejmenší možnou vzdálenost mezi jednotlivými pulzy. Disperzní vlivy tedy určují mezní frekvenci signálu, který lze vláknem přenést bez jeho deformace. Nedochází k úbytku energie, ale k jejímu rozkladu. Vliv disperze je znázorněn na obrázku 3.1. [1][2]



**Obr. 3.1:** Vliv disperze na přenášený signál [3][5]

Projevují se tyto druhy disperze:

- Materiálová disperze – Sklo použité na výrobu vlákna má index lomu závislý na vlnové délce. Z tohoto důvodu jsou jednotlivé spektrální složky přenášeného signálu šířeny různými skupinovými rychlostmi. [1][2]
- Vidová disperze – Převažuje u mnohavidových vláken. Jednotlivé vidy se šíří různými skupinovými rychlostmi, čas potřebný k překonání délky vlákna je různý a tím se rozšiřují pulzy. Lze ji potlačit užitím jednovidových popř. gradientních vláken v optické trase. [1][2]
- Chromatická disperze - Disperze se výrazně projevuje při lomu světla, kdy se jednotlivé barevné složky světla šíří odlišnými skupinovými rychlostmi v daném prostředí a zpoždění impulzů deformuje výsledný tvar signálu. Optické vlastnosti látky jsou charakterizované indexem lomu, který je závislý na vlnové délce. [1][2]

- 
- Vlnododová disperze – puls uprostřed jednovidového vlákna se nepřenáší pouze jádrem, ale jeho část zasahuje i do pláště vlákna. Materiál pláště má menší index lomu než jádro a tak se v něm energie šíří jinou rychlostí. [1][2]
  - Polarizační vidová disperze – Ovlivňuje šíření optického signálu v optickém vlákne stejným způsobem jako jiné druhy disperze. Projevuje se časovým roztažením signálu a jeho následným zkreslením vlivem rozdílných rychlostí šíření jednotlivých polarizačních složek. Vyskytuje se u jednovidových vláken a je limitujícím faktorem pro dosažení mezních přenosových rychlostí. [1][2][4]

---

## 4 Ztráty na optických vláknech

Ztráty na optických vláknech jsou závislé na vlnové délce signálu a projevují se tak, že dochází k úbytku optického výkonu, který je schopen se dostat až na konec optického vlnovodu. V této kapitole se pojednává o jednotlivých typech ztrát. [14]

Dají se rozdělit do následujících skupin:

### 4.1 Ohybové ztráty

Ohybové ztráty vznikají při nedodržení podmínky totálního odrazu, když se špatně lomí paprsek do pláště a vyváže se z optického vlákna ven. Dají se dělit následovně:

- Mikroohyb – Jedná se o drobné nedostatky v geometrii vlákna, které způsobují ztráty mikroohybem. Takové vlákno má buď deformaci z výroby, nebo na něj působí vnější tlak. Tyto ztráty se obtížně dohledávají, často se určují experimentálním měřením. [1][12]
- Makroohyb – Při ohýbání optického vlákna dochází k jeho deformaci a se zmenšujícím se poloměrem ohybu se také zvětšuje šance na vyvázání části energie mimo vlákno. Jednovidová vlákna jsou na ohyby více náchylná nežli vlákna mnohovidová. S rostoucí vlnovou délkou se zvětšuje MFD a čím větší je MFD, tím větší vznikají ztráty při ohybu vlákna. Abychom předešli zbytečným ztrátám v ohybu, je vhodné řídit se pokyny výrobce vlákna. [1][12]

Mikroohyb je menší než je velikost poloměru optického vlákna.

Makroohyb je větší nežli velikost poloměru optického vlákna.

---

## 4.2 Absorpce

Absorpce se projevuje tak, že pohlcuje a zeslabuje optický signál procházející optickým vláknem a přeměňuje ho na teplo. Absorpce na jednovídných vláknech dosahuje menších hodnot než u vláken mnohovídných, proto SM vlákna dosahují menšího útlumu a jsou tak vhodnější pro dlouhé trasy, na kterých by MM vlákna neobstála. [14]

Dá se dělit následovně:

- Vlastní – Tato absorpce vzniká přímo v materiálu, z něhož je vlákno vyrobeno. Absorpce se nedá odstranit, ale dá se s ní manipulovat.
- Nevlastní - Optické záření je pohlceno molekulami nežádoucích příměsí, které se dostaly do materiálu během výroby, jako například vodní ionty OH nebo ionty kovů.

## 4.3 Rozptyl světla

### 4.3.1 Lineární

- Rayleighův rozptyl – Vzniká tepelnými kmity krystalické mřížky. Jedná se o důsledek elastických kolizí průchozího optického záření a molekul hmoty jádra optického vlákna. Dochází tak vytváření lomů a část paprsku se na nich odrazí a následně vyváže ven z optického vlákna. [13][14]
- Mieův rozptyl – Vzniká na nehomogenitách o stejné vlnové délce například nedokonalou geometrií, mikroohyby, mikroskopickými bublinkami či trhlinkami v jádru. Mieův rozptyl významně naroste, pokud geometrické nepravidelnosti překročí  $1/10$  vlnové délky. [14]



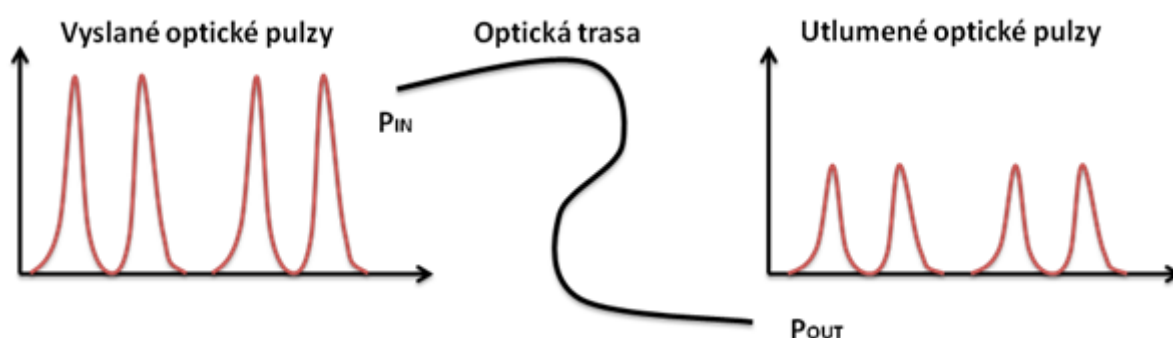
---

### 4.3.2 Nelineární

- Brillouův rozptyl – Akustická vlna o určitém výkonu způsobí lokální změnu indexu lomu a v daném místě se oddělí foton od signálu a postupuje v opačném směru proti této vlně. Jedná se tedy o interakci elektromagnetické vlny a lokálními změnami indexu lomu materiálu, které způsobilo akustické vlnění.
- Ramanův rozptyl – Jedná se o posun energie z nižší vlnové délky na vyšší. Účinnost Ramanova jevu se zesiluje stimulovanou emisí a vzniká za pomoci vhodného budiče (pumpy).

## 4.4 Útlum optických vláken

Na každé součástce, zapojené v optické trase, včetně samotného vlákna, vznikají ztráty optického výkonu. Útlum  $A$  je hodnota těchto ztrát, vyjadřuje se v decibelech a vypočítá se dle vzorce (7). Zpravidla bývá frekvenčně závislý. Útlum signálu způsobuje pokles amplitudy, v podstatě je to míra rozdílu mezi optickým výkonem do optického vlákna přivedeného a výkonem vystupujícím z vlákna. Vliv útlumu na signál je znázorněn obrázkem 4.1. Kvalita vlákna a útlum jsou ovlivněny použitým materiálem při výrobě, záleží na jeho čistotě. [1][2][14]



**Obr. 4.1:** Vliv útlumu na přenášený signál [3]

---

$$A(\lambda) = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_0} \text{ [dB, W]} \quad (7)$$

Útlum pro optický výkon měřený ve watech [2]

$$A(\lambda) = P_0 - P_1 \text{ [dB, dBm]} \quad (8)$$

Útlum pro hladiny optických výkonů měřených v jednotkách dBm [2]

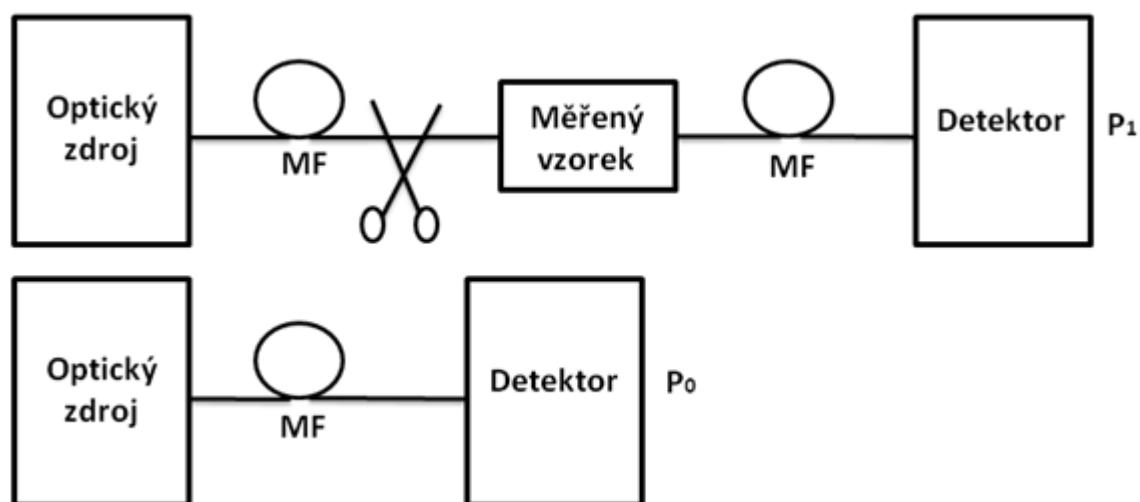
## 4.5 Metody měření útlumu na optických vláknech

Metody měření útlumu na optických vláknech dělíme do dvou skupin:

- První skupinu tvoří metody používající přímého měření ztrát optického výkonu při jeho průchodu testovaným vzorkem. Tyto přímé (transmisní) metody měření v jednom kroku měří optický výkon  $P_1$  se zapojeným měřeným vzorkem, ve druhém kroku se vzorek vyjme z optické trasy a změří se referenční optický výkon  $P_0$ . Útlum se následně dopočítá pomocí vzorce (7, 8) dle měřené jednotky. [2]
- Druhou skupinu představuje metoda zpětného rozptylu, kde je útlum vyhodnocován dle analýzy zpětného rozptylu přístrojem OTDR. [2]

### 4.5.1 Metoda dvou délek

Metoda dvou délek se uvádí jako nejpřesnější metoda měření útlumu, ale je destruktivní. Schéma na obrázku 4.2 představuje postup měření. Po zapojení optické soustavy a navázání optického signálu do ní, se změří výstupní výkon  $P_1$ . Po té co se změří výstupní výkon, se vlákno přefízne před měřeným vzorkem a při zachování stejných podmínek, se změří výstupní výkon  $P_0$ . [2]

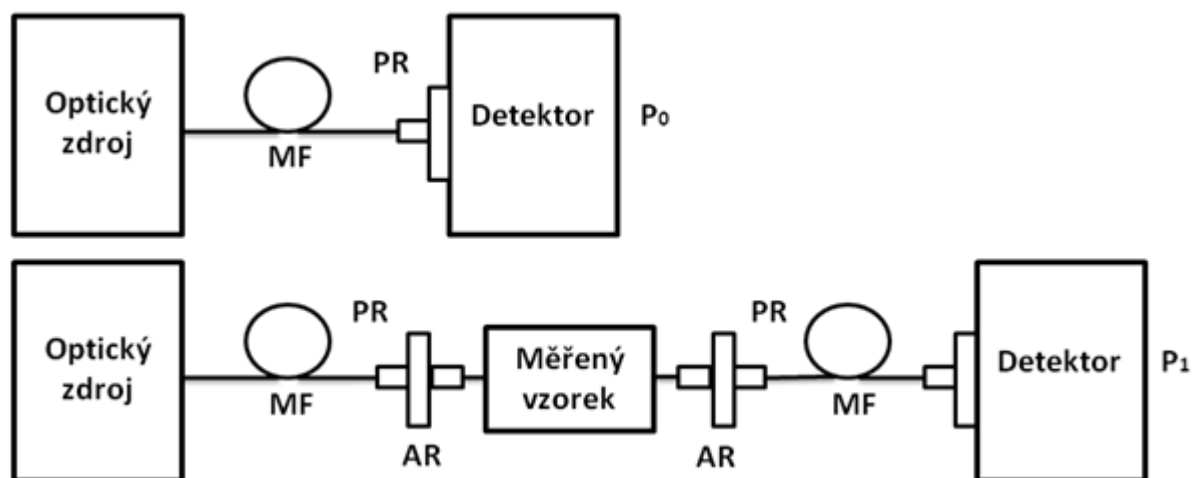


**Obr. 4.2:** Schéma měření metodou dvou délek [2]

Měření jednovíkových pasivních součástek se provádí s vidovým filtrem (mf – mode filter), který se umístí před měřený úsek a před fotodetektor. Vidový filtr má za úkol odstranit z jádra optického vlákna pro nás nežádoucí výkon, který není nesen základním videm. [2]

#### 4.5.2 Metoda vložných ztrát

Metoda vložných ztrát se obvykle používá pro změření útlumu na pasivních součástkách opatřených konektory. Přesnost této nedestruktivní metody omezují právě konektory. Schéma na obrázku 4.3 představuje postup měření. Nejprve se musí změřit referenční hodnota výkonu  $P_0$ . Následně je připojen měřený vzorek, za kterým můžeme naměřit  $P_1$ . [2]



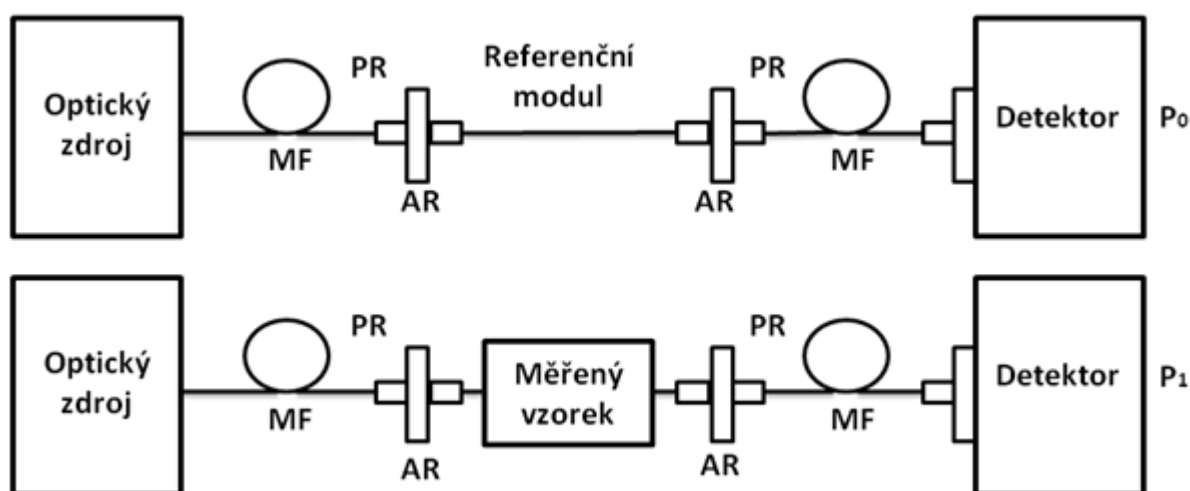
**Obr. 4.3:** Schéma měření metodou vložných ztrát [2]

---

Musí být použity měřicí spojky (Ar – reference Adapter) a měřicí spojovací moduly (Pr – reference Plug), jejichž útlum bude připočítán k útlumu měřené součástky. Tyto referenční součástky musí být vhodně zvoleny, měl by být použit stejný typ vlákna a odpovídající konektory, abychom se vyhnuli případným přídavným ztrátám způsobených rozdílnými vazebními ztrátami. [2]

#### 4.5.3 Metoda substituční

Metoda substituční slouží jako alternativa k metodě dvou délek. Je méně přesná, ale za to není destrukční. Schéma na obrázku 4.4 představuje postup měření. Při použití této metody nejprve použijeme speciální referenční spojovací modul (substitute jumper) a změříme hodnotu výkonu  $P_0$ . [2]

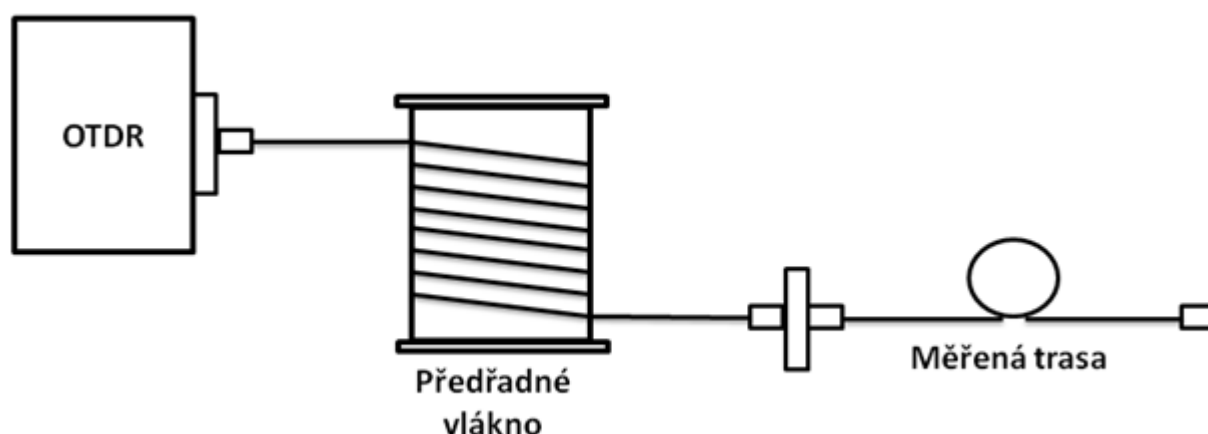


**Obr. 4.4:** Schéma měření metodou substituční [2]

Aby bylo dosaženo přesných výsledků při použití této metody, je nutno zvolit správný referenční spojovací modul. Modul by měl mít stejný typ vlákna a odpovídající kvalitní konektory jako měřený vzorek. Útlum měřících konektorů se u této metody nezapočítává do změřeného útlumu na součástce, na rozdíl od předchozí metody. [2]

#### 4.5.4 Metoda zpětného rozptylu (OTDR)

Metoda zpětného rozptylu je alternativní metoda měření útlumu založená na vyhodnocování křivky zpětného rozptylu. Používá se především při budování optických tras s jednovláknovým vláknem. OTDR má široké uplatnění jak v laboratořích, tak i v polních podmínkách díky své mobilitě. Schéma na obrázku 4.5 představuje postup měření. Při měření je doporučeno používat předřadné vlákno stejného typu jako v měřené trase. Jeden konec předřadného vlákna se připojí na měřenou optickou trasu a druhý konec na OTDR. Nejčastěji volíme délku předřadného vlákna 500 m nebo 1000 m. [2]

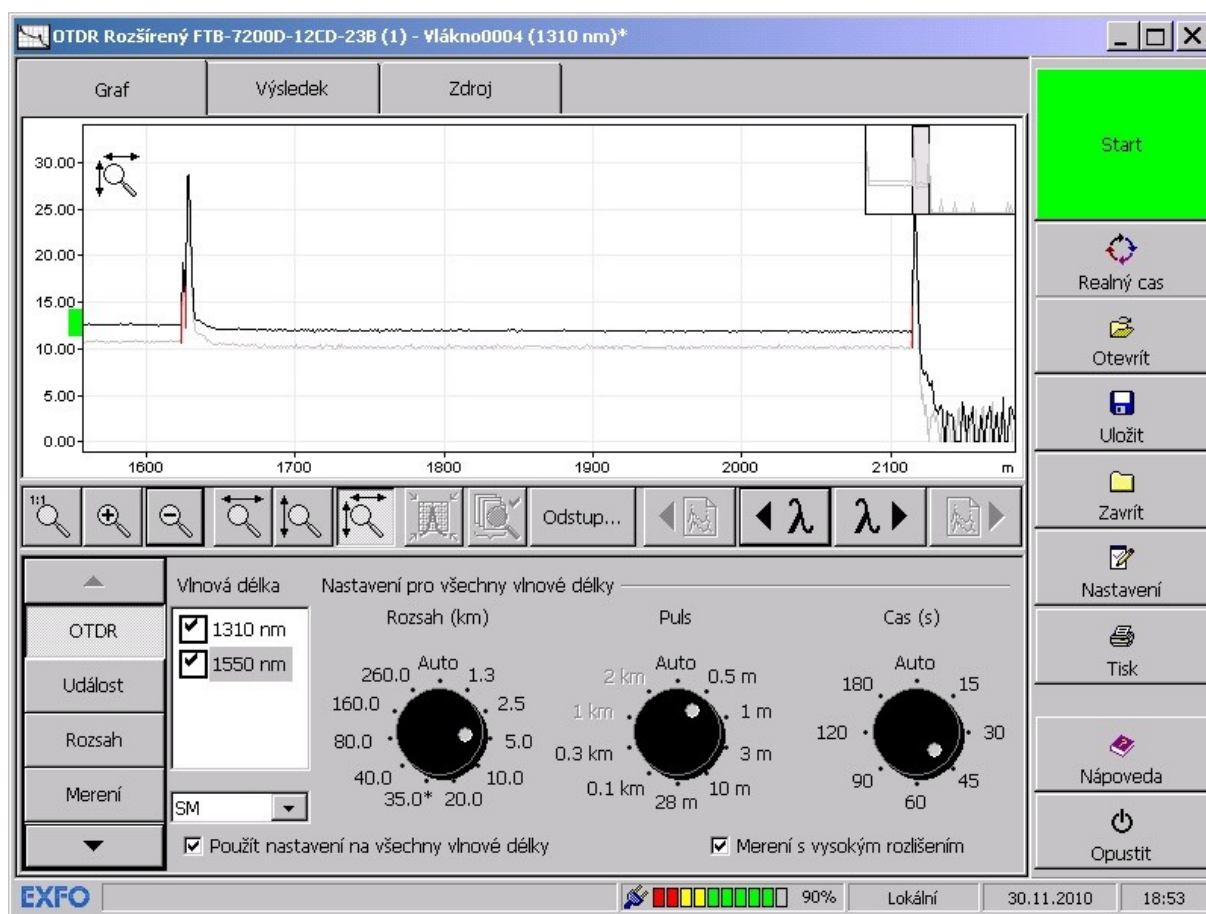


Obr. 4.5: Schéma měření útlumu metodou OTDR [2]

V přístroji je nutné ještě před měřením nastavit typ vlákna a vlnové délky měření, dále je možno nastavit ručně rozsah délky proměřované trasy, délku vyslaného pulsu a délku měření. Zařízení vyšle do měřené trasy sérii pulsů a poté vyhodnocuje časovou závislost zpětně rozptýleného optického výkonu. Tato metoda měření je založena na Rayleighově rozptylu a Fresnelových odrazech na nehomogenních částech měřené optické trasy. Po vyhodnocení přístroj zobrazí průběh křivky zpětného rozptylu. Je vhodné si nastavit horizontální a vertikální měřítko tak, aby byla křivka zobrazena co nejefektivněji. První kurzor se umístí na spoj předřadného vlákna a měřené optické trasy. Další kurzory jsou umísťovány podle účelu měření, např. na konec optické trasy pro zjištění útlumu na celé trase. Měření se provádí i z druhého konce optické trasy a výsledky se průměrují. Touto procedurou získáme výsledek srovnatelný s hodnotou získanou pomocí transmisních metod. Útlum celé trasy je určen vzorcem (9). [2]

$$A(\lambda) = \frac{[(P_0 - P_1)_{\text{směr } A-B} + (P_0 - P_1)_{\text{směr } B-A}]}{2} \text{ [dB]} \quad (9)$$

Útlum pro optický výkon měřený v dB [2]



**Obr. 4.6:** Průběh měření útlumu vlákna metodou OTDR

Křivka získaná touto metodou, zahrnuje kromě útlumu celé trasy i vstupní konektor, což je cenná informace. Příklad takové křivky je na obrázku 4.6. Měření metodou OTDR se provádí na vlnových délkách 1310 nm, 1550 nm a 1625 nm, jelikož na délce 1625 nm se více projevují ztráty zapříčiněné makro a mikroohyby na trase a jejich spojkách. Pokud se výsledky OTDR a transmisních metod rozcházejí, považují se výsledky transmisních metod za správné. [2]

---

## 5 Vláknové senzory

Senzor je zařízení reagující na vnější fyzikální nebo chemické podněty, které následně převádí na fyzikální signál, jenž je zpracován přístrojem. Vláknový senzor tak například reaguje na teplotu, otřesy či chemikálie a projeví se to na signálu, který tímto měřicím vláknem prochází. Uplatňují se zde změny především amplitudy, fáze a vlnové délky optického signálu, které jsou způsobené vlivem měřených veličin. [11]

Vláknové senzory jsou vhodné kvůli jejich malým rozměrům a váze. Takováto měření mají nízkou spotřebu energie a i přesto jsou citlivá v širokém rozsahu. Jejich odolnost vůči vnějším elektrickým a magnetickým polím může být v mnoha případech také užitečná. K různým typům měření se dá využít i stávající část optických telekomunikačních tras. Své využití takovéto senzory najdou například ve výrobě strojírenské či chemické, v potravinářství, ve farmacii a velkém množství jiných odvětví. [7][10][11]

Vláknové senzory se dají rozdělit například podle následujících parametrů:

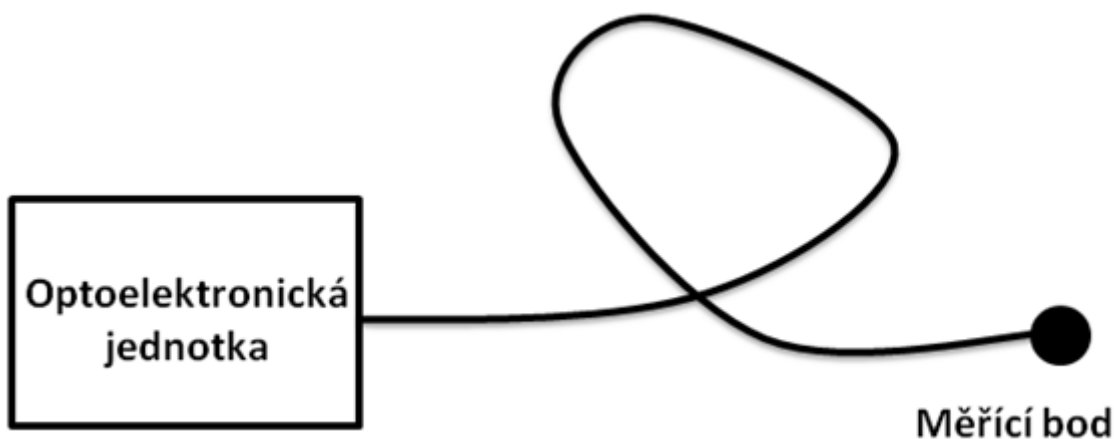
### 5.1 Dělení vláknových senzorů dle měřené veličiny

- Mechanické – vibrace, tlak, posun
- Teplotní – teplota v okolí vlákna
- Elektromagnetické – elektrická a magnetická pole
- Radiační – reakce pomocí fotonických materiálů
- Chemické – přítomnost a koncentrace daných látek
- Tok a vířivost tekutin – měření průtoku v kontrolních bodech
- Biomedicínské veličiny – sledování teploty, tlaku a obsah chemických látek

---

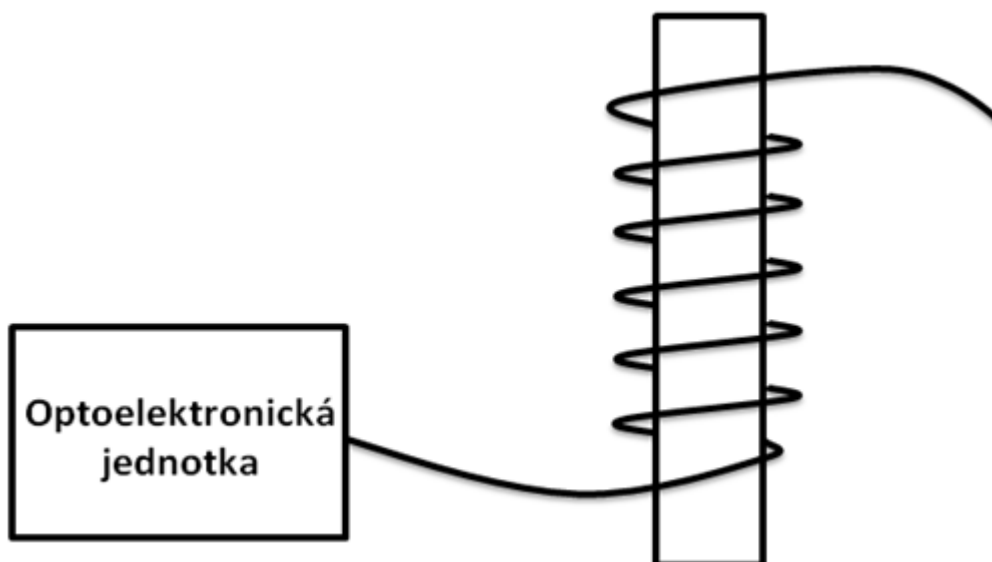
## 5.2 Dělení vláknových senzorů dle rozložení detekční části

- Bodový senzor – Měření dané veličiny probíhá v jednom určitém bodě. Takto pracuje velká část senzorů. Princip bodového senzoru je znázorněn na obrázku 5.1.



**Obr. 5.1:** Schéma měření s bodovým vláknovým senzorem

- Integrovaný senzor – Výsledná hodnota se určuje ze všech měřených hodnot. Integrovaný senzor je znázorněn na obrázku 5.2.



**Obr. 5.2:** Schéma měření s integrovaným vláknovým senzorem

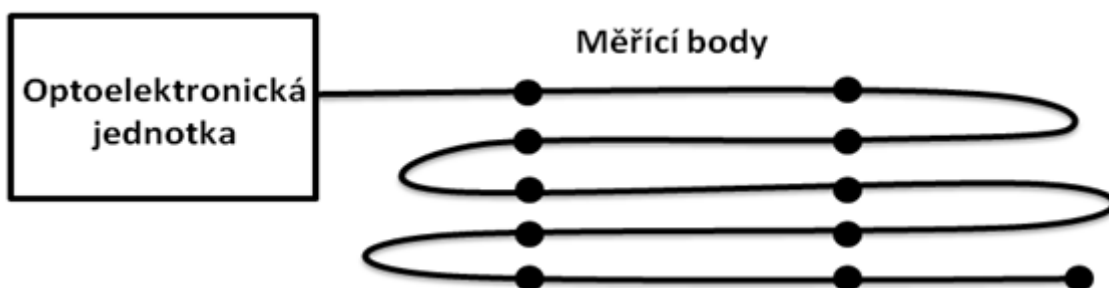


- 
- Distribuovaný senzor – Tento senzor detekuje po celé své délce a dokáže určovat konkrétní hodnoty v prostoru, jak je ukázáno na obrázku 5.3.



**Obr. 5.3:** Schéma měření s distribuovaným vláknovým senzorem

- Kvazi-distribuovaný senzor – Pracuje jako kombinace bodového a distribuovaného senzoru. K detekci dochází v definovaných bodech umístěných po délce měřícího vlákna, jak lze vidět na obrázku 5.4.



**Obr. 5.4:** Schéma měření s kvazi-distribuovaným vláknovým senzorem

---

### 5.3 Dělení vláknových senzorů dle povahy převodu měřené veličiny

- Intrinsitní vláknové senzory – jsou to takové senzory, u kterých probíhá interakce uvnitř optického vlákna. Tato vlákna často využívají Braggovských mřížek, které jsou umístěny uvnitř
- Extrinsitní vláknové senzory – tyto senzory jsou používány k vazbě světla v oblasti, kde světelný paprsek reaguje na měřenou veličinu. Takové oblasti lze dosáhnout například užitím mechanické spojky či svarem.

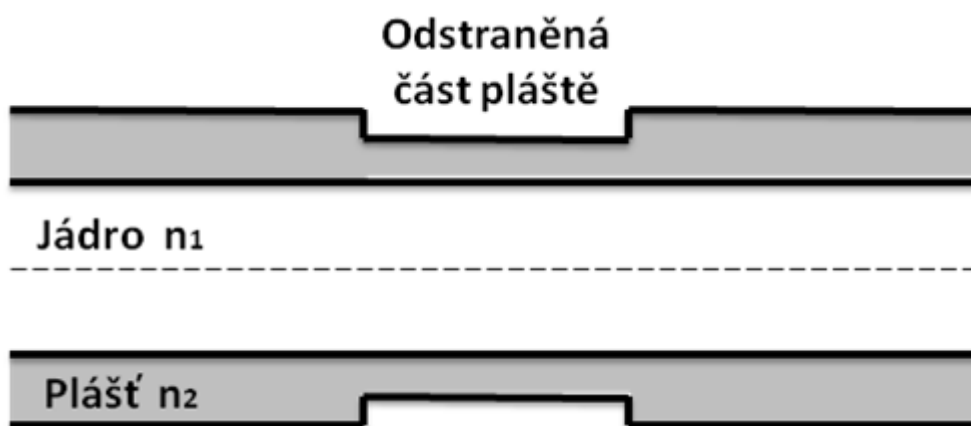
### 5.4 Senzor s evanescentní vlnou

Tyto senzory jsou založeny na interakci detekované veličiny s evanescentní vlnou, což je část vedené vlny, ale vlnou vůbec není. Její fáze je ve směru šíření neměnná, jelikož fázová konstanta má nulovou hodnotu a amplituda je exponenciálně klesající, protože konstanta útlumu je nenulová. Vzniká na rozhraní dvou prostředí s různými optickými vlastnostmi a šíří se podél něj, nejznámější případ je úplný odraz ve vlákne. V kolmém směru vůči rozhraní ubývá amplituda exponenciálně a zasahuje pouze desítky nm za rozhraní dvou prostředí, kde vznikla. Optické vlastnosti v plášti reagují a mění se vlivem detekované veličiny. Tyto změny optických vlastností mají vliv na přenášený vid a jsou následně detekovány. [7][10][16]

Intenzita evanescentní vlny exponenciálně ubývá s rostoucí vzdáleností od rozhraní jádra a pláště. Čím více zasahuje evanescentní vlna do analytu, tím je detekce citlivější. Pro zajištění přístupu měřených látek k rozhraní jádra a pláště je více metod:

#### 5.4.1 Optické vlákno s odstraněnou částí pláště

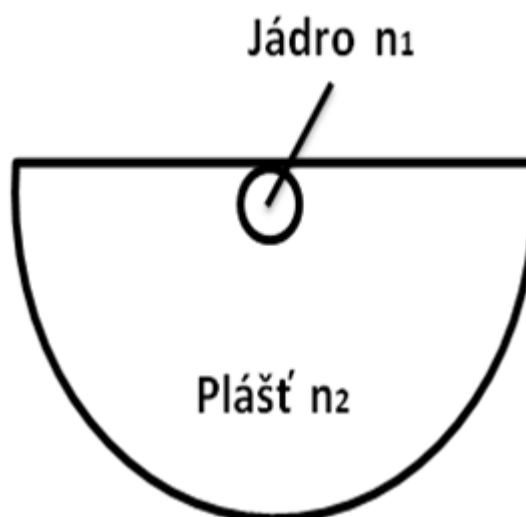
Pro zajištění lepšího přístupu evanescentní vlny k měřené veličině se například odleptává část pláště, jak lze vidět na profilu uvedeném na obrázku 5.5.



**Obr. 5.5:** Profil optického vlákna s odstraněnou částí pláště

#### 5.4.2 Speciální vlákna s nekruhovými průřezy

Příkladem vlákna s nekruhovým průřezem může být D-vlákno, připraveno z vhodné obroušené kruhové preformy, jak je zobrazeno na obrázku 5.6. Evanescentní vlna má na takto upraveném vlákně zajištěn lepší přístup k analytu. [10]



**Obr. 5.6:** Profil D-vlákna

---

### 5.4.3 Mikrostrukturní optická vlákna - MOF

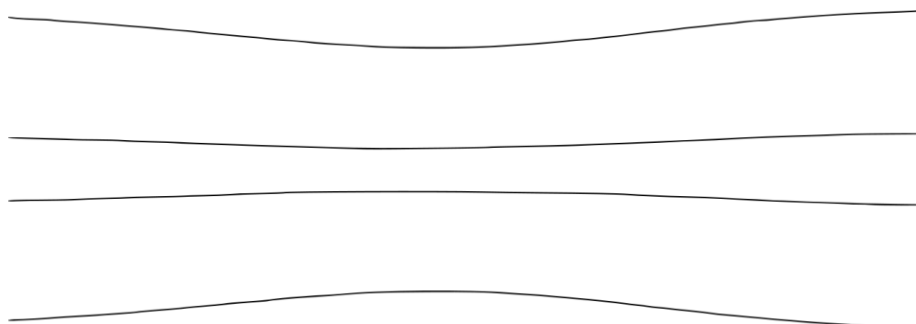
Jedná se o nový typ optických vláken, jež mají v plášti otvory, kterými je jádro axiálně obklopeno. Díky těmto periodicky rozmístěným plášťovým otvorům se analyt může dostat blíže k jádru, kde má evanescentní vlna větší citlivost detekce. [11]

### 5.4.4 Kónicky zúžená vlákna – tapery

Tapetováním optických vláken se dosáhne kónických zúžení na vláknu a takto tvarované části jsou zajímavé pro užití v senzorice.

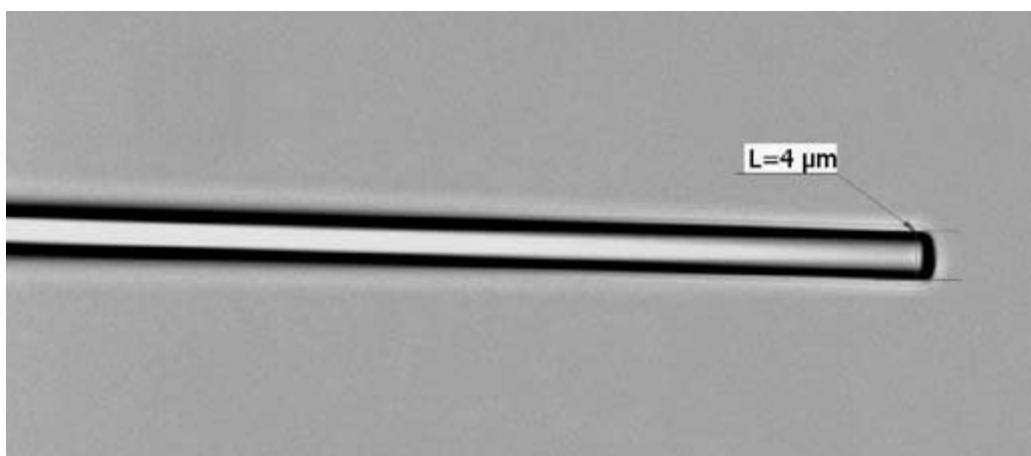
Existují ve dvou provedeních:

- Se dvěma kónusy – biconical  
Jedná se o klasické optické vlákno, na kterém byla tažením vytvořena zúžená část, která je k vidění na obrázku 5.7.



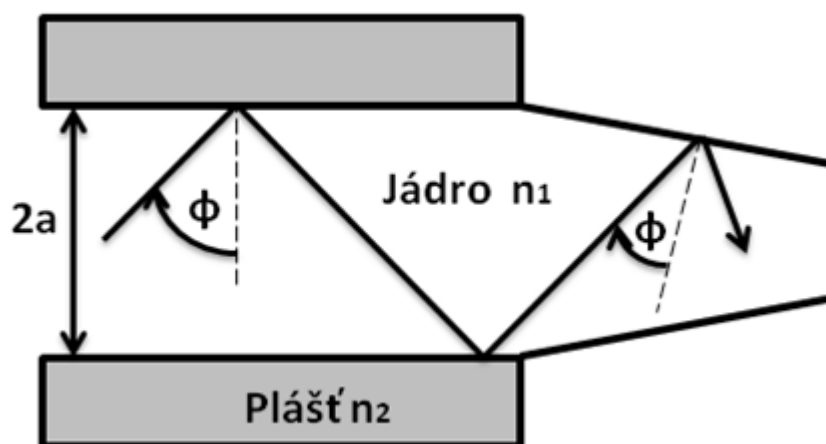
**Obr. 5.7:** Profil zúženého vlákna se dvěma kónusy

- S jedním koncem do špičky – fiber tips  
Často se provádí povrchová úprava, kdy se na špičku nanáší různé typy materiálů volené dle aplikace. Špička se následně používá jako sonda pro senzorické aplikace. Příklad taperované špičky je uveden na obrázku 5.8.



**Obr. 5.8:** Mikrofotografie zalomené špičky o průměru 4  $\mu\text{m}$

Kónicky tvarovaná vlákna zmenšují poloměr jádra  $a$  i reflexní úhel  $\phi$  na rozhraní jádra s pláštěm, jak je znázorněno na obrázku 5.9. Takto se do evanescentního pole dostane větší výkon a zvýší se tím citlivost detekce měřených veličin. Často se na takovéto zúžené tvary nanáší detekční vrstvy, které různými způsoby vylepší pracovní parametry vlákna. [11]



**Obr. 5.9:** Princip šíření signálu v zúžených vláknech

Tapery se dají vyrábět například tak, že se vlákno upne do speciálního přípravku, který deformuje vlákno předem určeným tahem po té, co dojde k jeho zahřátí hořákem, laserem či tažící pecí. V případě této diplomové práce se však kónická zakončení vyráběla pomocí svářečky optických vláken, která při svaru působila předem definovaný tah svařovaných konců optických vláken od sebe.

---

## 6 Svařování

Jednotlivá optická vlákna se vyrábí v délkách řádu kilometrů a je nutné spojovat je buď svařováním elektrickým výbojem, nebo pomocí různých optických spojek a konektorů. [9]

Svařování je v dnešní době jedním z nejpoužívanějších způsobů ke spojení optických vláken. Jedná se o poměrně složitou operaci, kterou přesně provádí speciální svářečka k tomu určená, viz. obrázek 6.1. Při spojování optických vláken pomocí optických konektorů se vlákna připojují především k dalším součástkám v optické trase. Svar nejčastěji spojuje delší úseky vláken, popř. je vhodný pokud chceme konec vlákna opatřit tzv. pigtailem. Svar je nerozebíratelný typ spoje. V nutnosti rozpojení je nutné spoj přerušit či zalomit. [5]



**Obr. 6.1:** Svářečka Fujikura FSM 45PM

---

## 6.1 Princip svařování optických vláken

Nejprve se speciálními kleštěmi odstraní primární ochrana z konce vlákna tak, aby zůstala obnažená část vlákna o potřebné délce několika cm. Následně se konec vlákna očistí od zbytků primární ochrany a případných nečistot. Při svařování optických vláken je nutné mít oba konce vlákna rovně zaříznuté a zbavené případných nečistot v podobě mastnot a prachu. K rovnému řezu se používá precizní řezačka optických vláken. Čištění konců vláken se provádí bezchloupkovým ubrouskem namočeným v izopropylalkoholu a následným vysušením suchou částí ubrousku. [2]

Takto připravené vlákno se umístí do V drážky řezačky optických vláken, posuvem v drážce se nastaví požadovaná délka obnaženého vlákna, to se v řezačce zaaretuje, aby bylo zabráněno jeho posuvu, a nakonec je ostrým kotoučem v řezačce přeříznuto. Zaříznutý konec vlákna se z řezačky vyjme, může být opět očištěn, a je připraven na vložení do svářečky optických vláken. Pokud by nebyly konce optických vláken takto upraveny, docházelo by ke zbytečnému navýšení útlumu svaru, ale s velkou pravděpodobností by je svářečka vyhodnotila jako nevhodné a odmítla by s nimi pracovat.

Umístění konce optického vlákna do svářečky probíhá podobně jako u lámačky optických vláken a to do V drážky. Svářečka disponuje dvěma drážkami pro každé vlákno. Do větší drážky s možností aretace se vkládá konec vlákna opatřený ochranným pláštěm, který je následně zafixován. Druhá V drážka je menší a pohyblivá, slouží k vedení obnaženého optického vlákna. Po umístění obou konců do patřičných V drážek svářečky se může zahájit příprava před svarem.

Chod zařízení je nastaven jedním z mnoha profilů, které jsou k dispozici, včetně upravitelných. Po spuštění procedury sváření, zařízení oba konce optických vláken proti sobě vycentruje a začistí případné nedostatky lomu krátkým, elektrickým výbojem. Svářečka optických vláken Fujikura FSM-45PM, která byla použita pro tvorbu svarů k účelům této diplomové práce, je odlišná od standardních a plně automatizovaných svářeček, jak širokou škálou nejrozličnějších nastavení, tak i tím, že vlákno otáčí po jeho vlastní ose. Otáčené konce vláken jsou snímány CCD kamerou uvnitř svářečky, aby následně mohla vyhodnotit jejich nejvhodnější vzájemnou polohu proti sobě, za cílem dosažení co nejmenšího útlumu svaru. Po nalezení vhodné polohy, svářečka přiblíží oba konce optických vláken k sobě na nastavenou vzdálenost a svaří je k sobě elektrickým výbojem, který je také plně definovatelný. [5]

Po skončení elektrického výboje se pomocí systému PAS zjistí vzájemná poloha jader a odhadne se útlum svaru. Posledním krokem je test tahem, kdy svářečka zlehka zatáhne obě stále ještě zafixované V drážky od sebe. Tím končí práce svářečky a vlákno opatřené svarem lze vyjmout. [2]

---

## 6.2 Popis svářečky

Hlavním nástrojem při praktické části této diplomové práce byla svářečka optických vláken Fujikura FSM-45PM. Jedná se o plně automatickou přenosnou svářečku vybavenou přehledným monitorem a píčkou pro zatavení ochrany sváru. Konce optických vláken se umisťují do V-drážek, svářečka je následně vystředuje dle jádra (Core alignment) naproti sobě pomocí systému PAS (Profile Alingnment System) v rovinách X/Y. Naproti sobě postavené konce optických vláken jsou ještě protočeny ve své ose, kdy zařízení hledá nejvhodnější vzájemnou pozici protilehlých konců pro dosažení co nejmenšího útlumu a následně provede samotný svar. Tato svářečka umí pracovat také s PM vlákny (polarization maintaining fiber), která zachovává lineární polarizaci pro světelné paprsky procházející vláknem.

## 6.3 Měření útlumu svaru

Útlum svaru je odhadnut svářečkou ihned po dokončení svaru. Jsou pro to tři metody používané různými výrobci. Pokud chceme měřit útlum svaru na optické trase, je nutné použít metodu zpětného rozptylu OTDR. Jedním z cílů této práce je opakované měření útlumu sváru, z toho důvodu bylo možné použít transmisní metody měření útlumu [2].

### 6.3.1 Vyhodnocení útlumu svaru pomocí svářečky

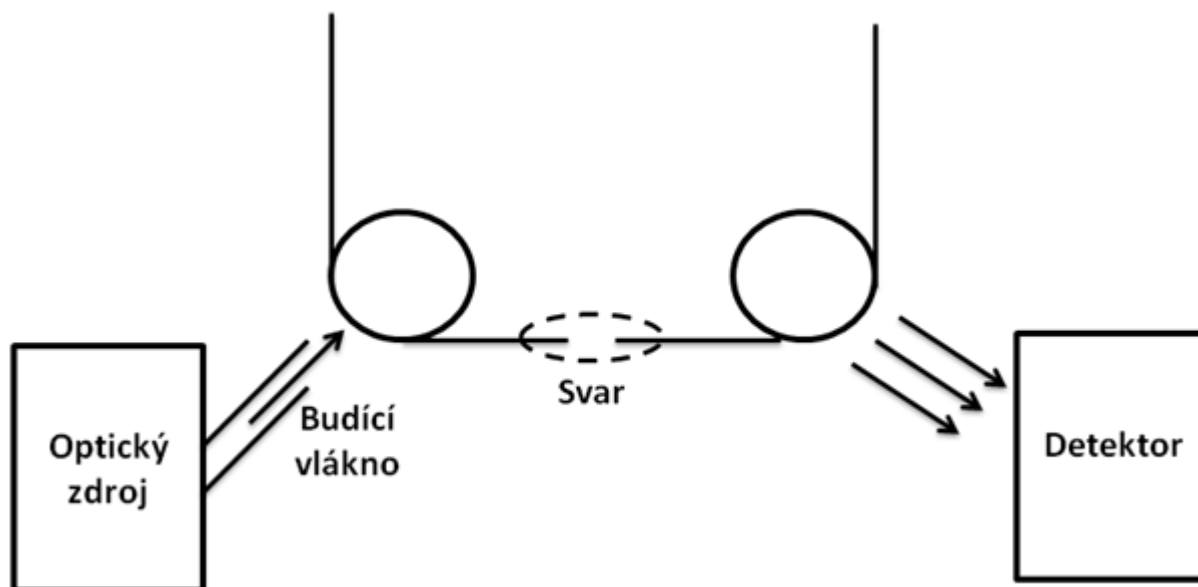
Svářečky optických vláken využívají tři různé principy na vyhodnocení útlumu vlákna:

- LID (Local Injection and Detection)
- PAS (Profile Alignment System)
- RTC (Real Time Control)



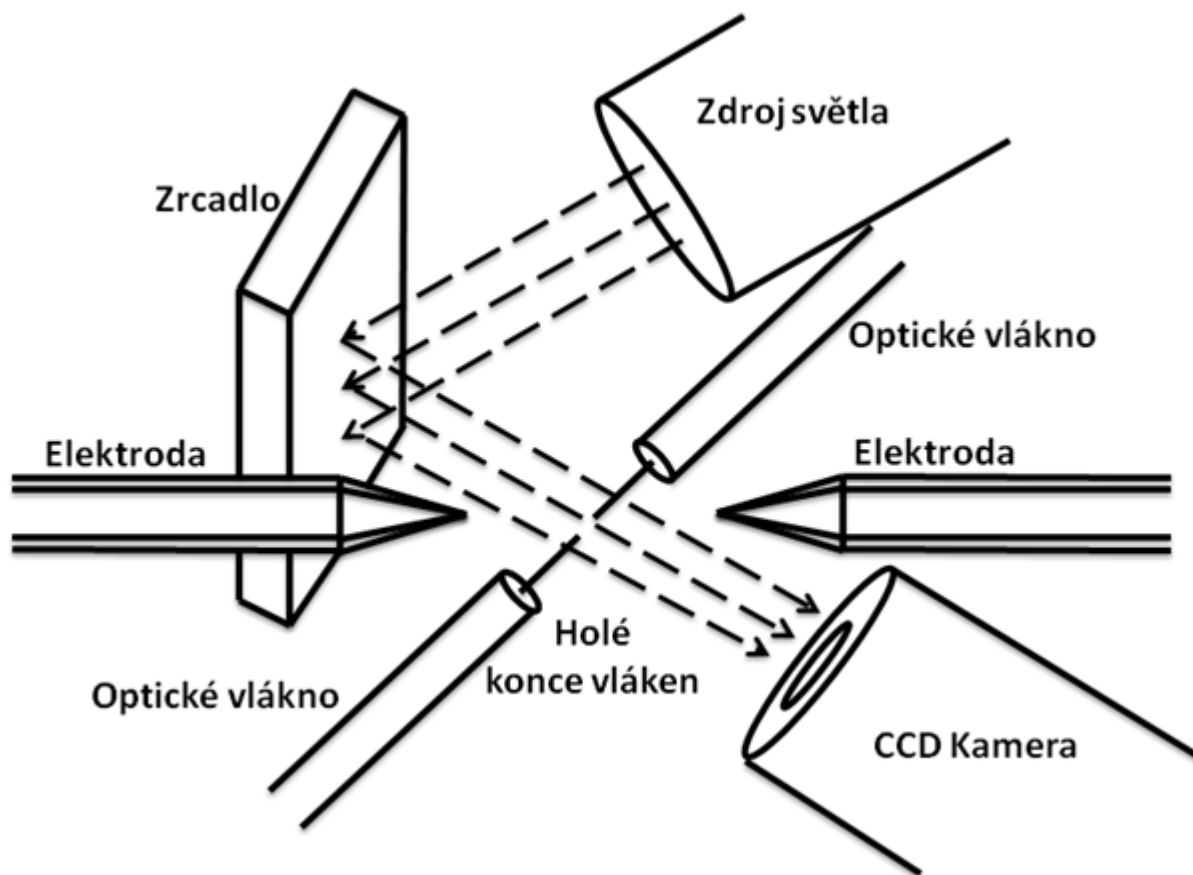
---

**Systém vyhodnocování LID** je používán ve svářečkách Siemens neboli RXS, je schematicky zobrazen na obrázku 6.2. Svařovaná vlákna jsou prudce ohnuta před i za svarem. Před svarem je do místa ohybu navázáno optické zařízení, které je v druhém ohybu za svarem opět vyvázáno a změřeno. Útlum lze vypočítat podle vzorce (7), kde výkon  $P_0$  je změřen ještě před samotným svarem v době kdy jsou konce vláken vůči sobě ideálně postaveny a výkon  $P_1$  je změřený po svaření vláken. Hodnota  $P_0$  je velmi závislá na nečistoty svařovaných konců, či jiné nedokonalosti konců vláken. [2]



**Obr. 6.2:** Měření útlumu sváru metodou LID [2]

**Metodu vyhodnocování PAS** používá japonský výrobce Fujikura. Tento systém je použitý i ve svářečce Fujikura FSM-45PM, která sloužila k praktické části této bakalářské práce. Princip je zobrazen na obrázku 6.3. Oba konce vláken jsou osvětlovány kolimovaným optickým svazkem ze zdroje záření. CCD kamera zabudovaná svářečce snímá dva obrazy hotového svaru ve dvou k sobě vzájemně kolmých pohledech. Následně je útlum vyhodnocen dle odchylek obou jader vůči sobě v obou pohledech. [2]



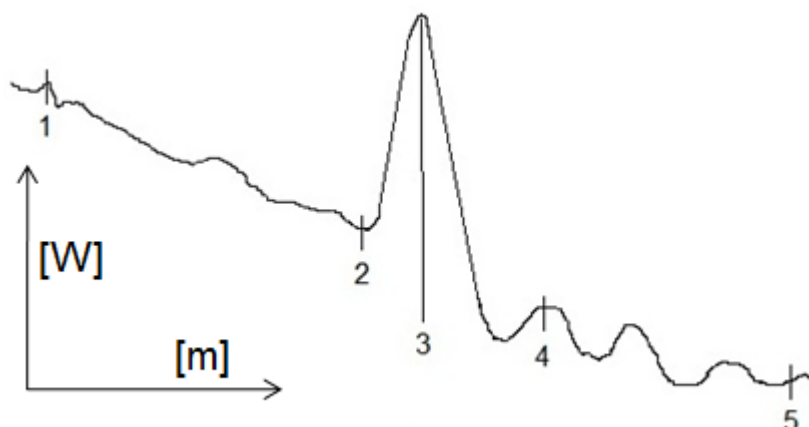
**Obr. 6.3:** Měření útlumu sváru metodou PAS [2]

**Metoda RTC** je používána ve svařkách od firmy Ericsson a je založena na odlišném principu. Oba konce svařovaných vláken se krátkým svařovacím impulsem začnou zahřívat a vyzařované světlo je zachyceno a vyhodnoceno. Jádru a plášť jsou materiálově odlišné a tak obě části vyzařují rozdílné spektrum, podle kterého je v reálném čase vyhodnocována poloha jader vláken. Po svaření vláken je hodnota útlumu svaru zjištěna v posledním kroku kontroly. [2]

### 6.3.2 Metoda zpětného rozptylu (OTDR)

Průběžné měření útlumu během výstavby optické trasy je velmi užitečné, ale proveditelné pouze metodou OTDR. Pro měření útlumu svaru je velmi podobný postup jako při měření optické trasy. Nejprve je nutné nastavit určité parametry v přístroji, připravit si vhodné měřítko a pak se mohou umístit kurzory. Druhý a čtvrtý kurzor by měly být umístěny z obou stran co nejbližší předpokládanému sváru. Co nejdále od těchto kurzorů umístíme na lineární části křivky další kurzory

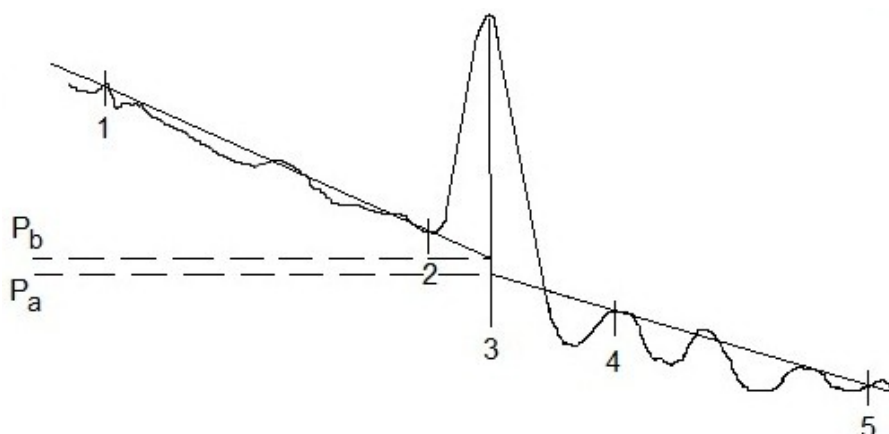
– první a pátý. Třetím kurzorem je možné, ale ne povinné označit přesnou pozici svaru. Příklad takového nastavení kurzorů lze vidět na obrázku 6.4. [2]



**Obr. 6.4:** Měření útlumu svaru metodou OTDR [2]

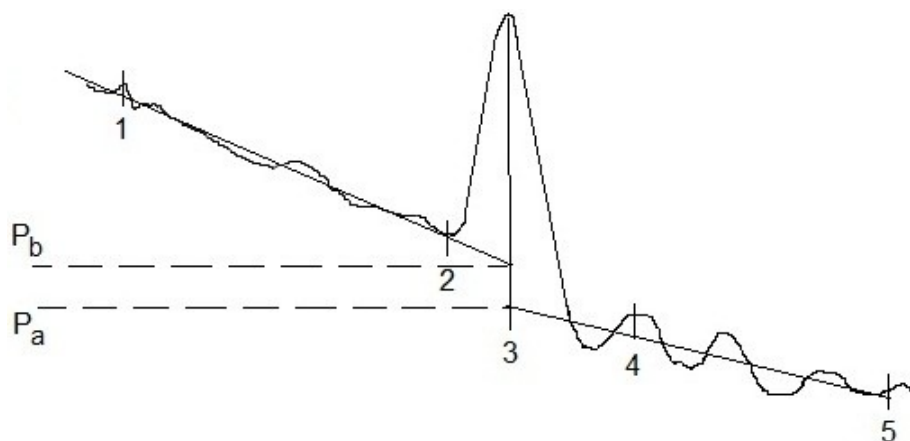
Měřič zpětného rozptylu následně aproximuje lineární část křivky mezi kurzory 1, 2 a 4, 5 a tyto části následně proloží přímkou. Používají se dvě metody aproximace. Na obrázcích 4.3, 4.4 a 4.5 je umístěn 4. kurzor ne zcela vhodně, aby byl patrný rozdíl v aproximační přímce u porovnání dvoubodové metody s metodou LSA. [2]

- Dvoubodová metoda – aproximační přímka je proložena body, ve kterých jsou umístěny dvojice kurzorů. Nevhodným umístěním kurzorů se můžeme dopustit chyby měření útlumu, jelikož by proložená aproximační přímka nemusela odpovídat křivce průběhu OTDR. Příklad aproximace dvoubodovou metodou je zobrazen na obrázku 6.5. [2]



**Obr. 6.5:** Aproximace křivky OTDR dvoubodovou metodou [2]

- Metoda LSA – využívá k nalezení aproximační křivky metody nejmenších čtverců, kdy jsou jednotlivé nehomogenity na křivce OTDR do značné míry eliminovány. Průběh aproximace metodou LSA je naznačen na obrázku 6.6. [2]



**Obr. 6.6:** Aproximace křivky OTDR metodou LSA [2]

Pokud jsou dva svary blízko za sebou, je nutné při použití metody OTDR změřit útlum obou svárů zároveň. Moderní OTDR přístroje při měření útlumu automaticky označí svar čtveřicí pomocných kurzorů. I při měření útlumu svaru se snažíme o měření z obou stran optické trasy a to na obou vlnových délkách. [2]

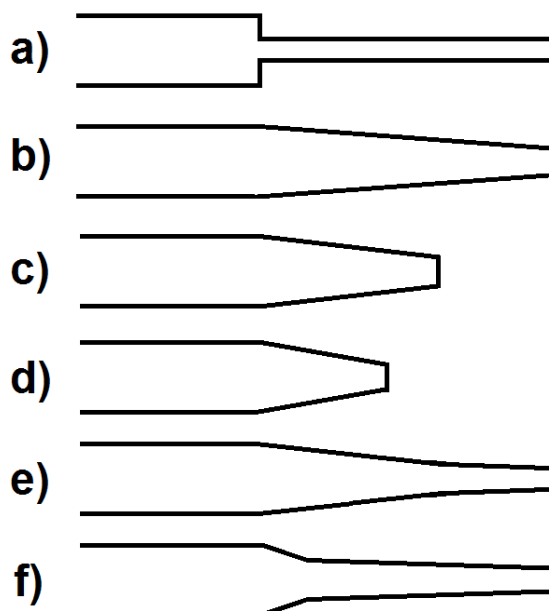
## 6.4 Tapering

Tapering je proces, při kterém tažením konců vláken od sebe vzniká zúžení v oblasti spoje optických vláken. Taperovaná vlákna mají v určité délce velmi zúžený průměr, viz obrázek 6.7. Takováto vlákna s kónickým zúžením se využívají především v optické sensorice. Jejich struktura je navržena tak, aby na rozdíl od telekomunikačních vláken měla tato vlákna definovanou citlivost k vnějším fyzikálním a chemickým faktorům. Takovéto zúžení vláken se dá provést více způsoby, např. použitím  $\text{CO}_2$  laseru, elektrického oblouku, tažicí věže s grafitovou pecí nebo cíleného zužování vlákna s regulovaným plynovým hořákem. Pro náš účel je ale nejvhodnější k tomuto využít svářečku optických vláken. V rámci této diplomové práce se pracovalo s přístrojem Fujikura FSM-45PM a taperoval se svar dvou vzájemně vycentrovaných konců optických vláken. [6][9][10]



**Obr. 6.7:** Příklad optického vlákna, jenž je v určité délce taperováno [6]

Taperován nemusí být jen spoj či úsek vlákna. Takto může být upraven i konec vlákna, jež pak utvoří kónické zakončení, které může být použito např. jako optická sonda detekující fyzikálně chemické veličiny použitelné např. v biochemii. Různé typy taperovaných konců jsou zobrazeny na obrázku 6.8. [10]



**Obr. 6.8:** Typy špičatých zakončení: a) skokové leptání; b,c,d) postupný tapering; e,f) kombinace více typů taperingu

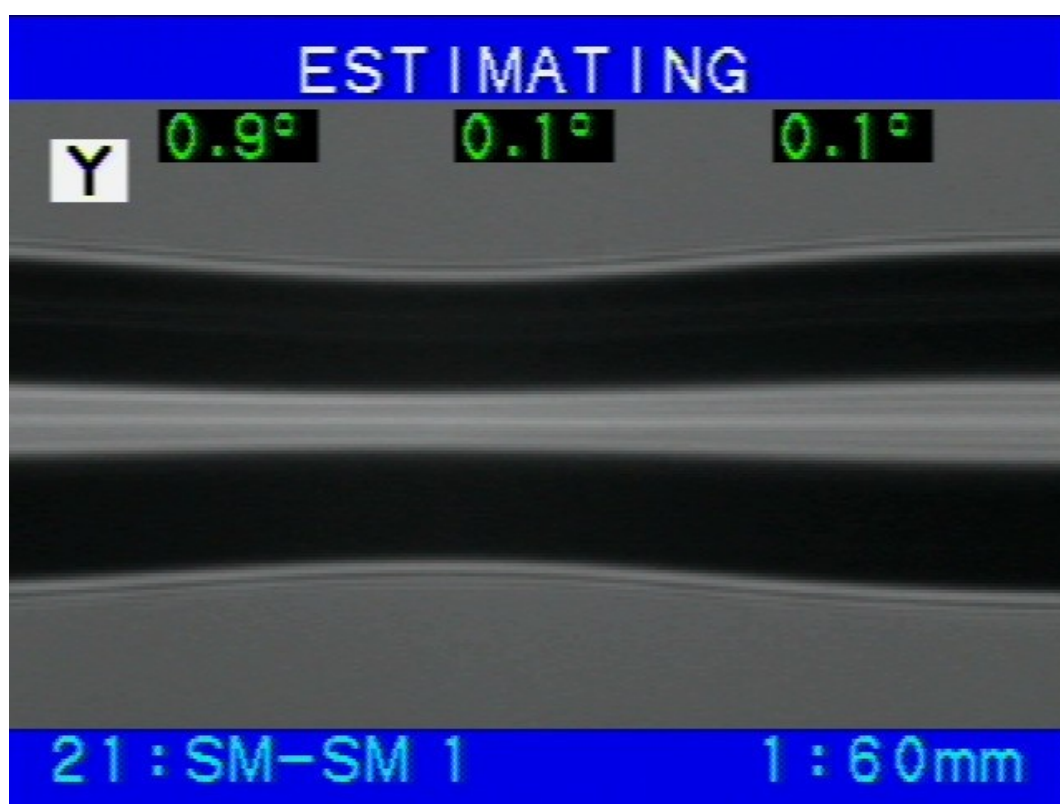
---

## 7 Postup měření

V této kapitole jsou uvedeny postupy napříč celým měřením, které probíhalo v rámci této diplomové práce. První část se věnuje postupu měření při zjišťování geometrie taperovaných vláken. Druhá část kapitoly se zabývá postupem při měření hodnot útlumu vzniklém na taperovaném svaru.

### 7.1 Měření geometrie kónických zakončení

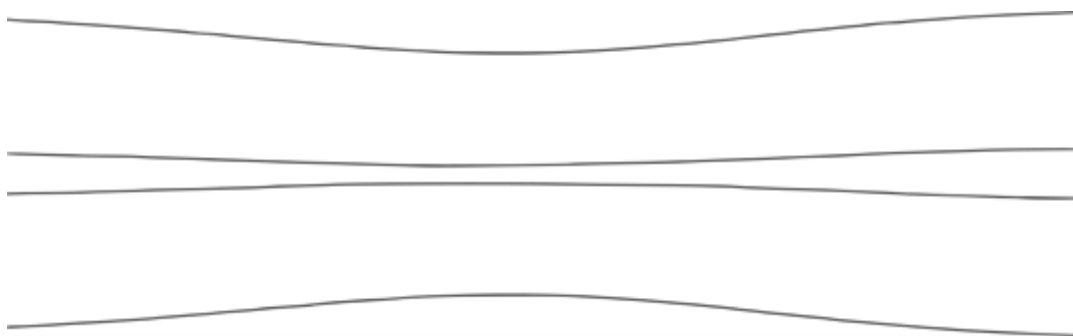
Hotový taper je potřeba geometricky popsat. Jako zdroj dat byl zvolen obraz svaru vyhotovený CCD kamerou umístěnou uvnitř svářečky Fujikura. Svářečka je opatřena LCD displejem, který zobrazuje mimo jiné i průběh samotného svařování, ale také televizním výstupem, který poskytuje identický obraz jako LCD displej. Na televizní výstup svářečky se připojí zařízení, které digitalizuje obraz a přes port USB jej následně ukládá do počítače. Záběr čerstvě vytvořeného taperu je na obrázku 7.1.



**Obr. 7.1:** Tvorba taperovaného svaru

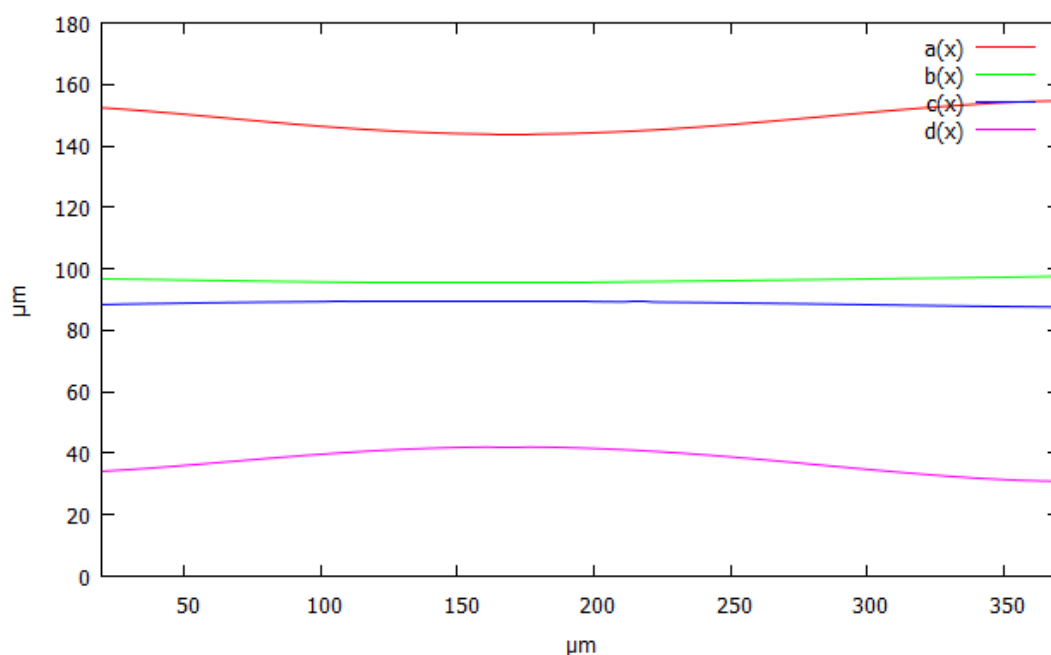
---

Obraz je nutné upravit tak, aby vynikly linie svařeného vlákna. Jedná se převážně o úpravy jako korekce jasu a kontrastu a následné odstranění barev z ploch, které jsou prováděny v programu Gimp. Takto získané křivky jsou následně programem Inkscape převedeny na vektory, jako jsou zobrazeny na obrázku 7.2. Vektory se poté importují do programu Rhinoceros 3D, což je software pro modelování prostorových objektů.



**Obr. 7.2:** Profil taperovaného svaru složen z okrajových křivek

Rhinoceros každý vektor ovzorkuje velkým množstvím bodů, jejichž souřadnice následně jsou exportovány do textového souboru. Po nutných úpravách lze souřadnice bodů vložit do tabulkových programů jako Microsoft Excel, popř. do programů matematických jako Matlab či Mathcad, které z nich dokážou vytvořit graf odpovídající zakřivení svaru optických vláken. Sestrojený graf je uveden na obrázku 7.3.



**Obr. 7.3:** Graf odpovídající profilu taperovaného vlákna

---

Výsledný graf se nechá proložit spojnici trendu polynomu pátého stupně, což nám prozradí matematické vyjádření funkce, která reprezentuje tvar svaru. Např. ve zmíněném programu Microsoft Excel je nutné u výsledných polynomů zrušit zaokrouhlování a nechat si vypsát celý tvar polynomu. Při zpětné rekonstrukci křivek ze zaokrouhlovaných polynomů bylo zjištěno, že výsledné křivky se značně liší od původního profilu taperovaného svaru.

Příklad funkcí reprezentujících profil taperovaného svaru:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}(x) = & 7,79602757776185 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 - 1,43226285391452 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 \\ & + 7,31063523396535 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,00107421501551757 \cdot x^2 \\ & - 0,0198652792452471 \cdot x + 153,154717316796 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{b}(x) = & 5,73133221147333 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 - 5,9937982926199 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & + 2,17758673220394 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 2,70352043777894 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 \\ & + 0,000202828441270729 \cdot x + 96,8061000951189 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{c}(x) = & 6,03684897996382 \cdot 10^{-13} \cdot x^5 - 2,62616169349988 \cdot 10^{-10} \cdot x^4 \\ & + 5,69261896205366 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 - 7,37852942093511 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 \\ & + 0,0203443089006015 \cdot x + 87,9952870087529 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{d}(x) = & -4,37627457682059 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 + 1,13307376198754 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 \\ & - 6,43287505984751 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 9,86020757751232 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 \\ & + 0,0169992036457084 \cdot x + 33,4559246170403 \end{aligned}$$



---

## 7.2 Měření velikosti útlumu kónických profilů

Měření útlumu probíhá pomocí přístrojů EXFO AXS-200/350, viz. obrázek 7.4. Jedná se o certifikační měřidlo útlumu. Přístroje jsou schopny pracovat s jednovidovými i mnohovidovými vlákny na patřičných vlnových délkách. Pro jednovidová vlákna jsou to vlnové délky 1310 a 1550 nm, pro mnohovidová vlákna jsou to vlnové délky 850 a 1300 nm. Velký a barevný displej umožňuje přehledné měření i nastavování přístroje pomocí prostorné klávesnice.

Nejprve je nutné provést referenční měření, při kterém získáme referenční hodnoty útlumu. Následná měření taperovaných vzorků jsou stále vztahována k naměřené referenci. Referenční měření probíhalo na vláknu stejného typu i délky, jenž má na obou svých stranách přivažené pigtaily. Takto je zajištěna co největší shoda referenčního vlákna s měřeným vzorkem. Jediným rozdílem je přítomnost taperovaného svaru na měřeném vzorku.

Po uložení reference je možné měřit útlum na taperovaných vláknech. Nejprve je nutno každý vzorek opatřit na obou stranách pigtaily a ty následně připojit k přístrojům EXFO. Na zdroji je nutné nastavit typ vlákna a patřičnou vlnovou délku, popř. jejich přepínání. Měřidlo automaticky detekuje příslušné vlnové délky, pouze se tu nastavuje měřená veličina.

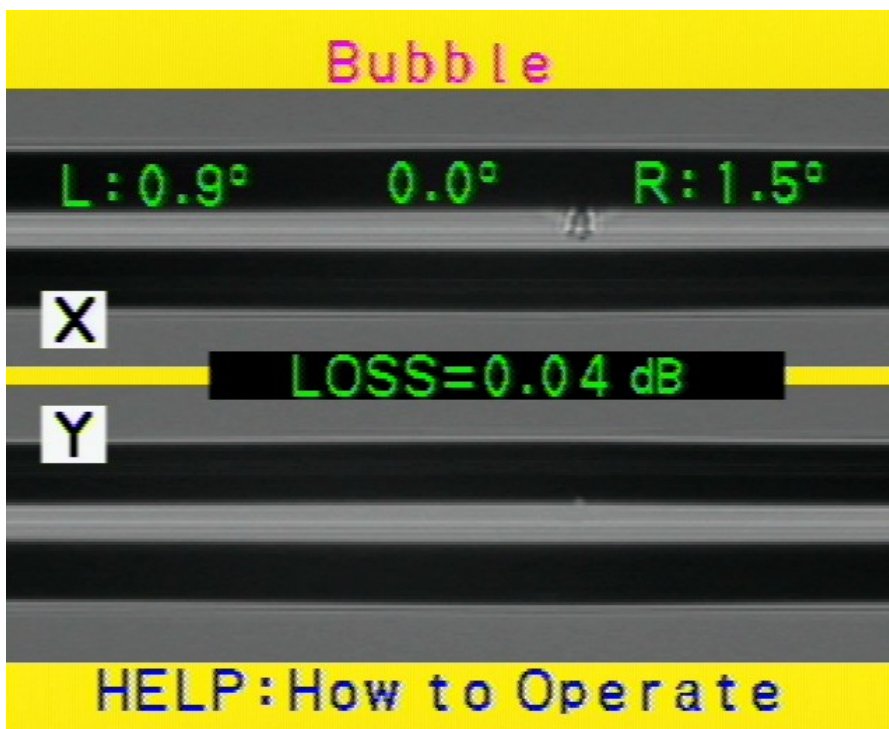


**Obr. 7.4:** Certifikované měřidlo útlumu EXFO AXS-200/350

---

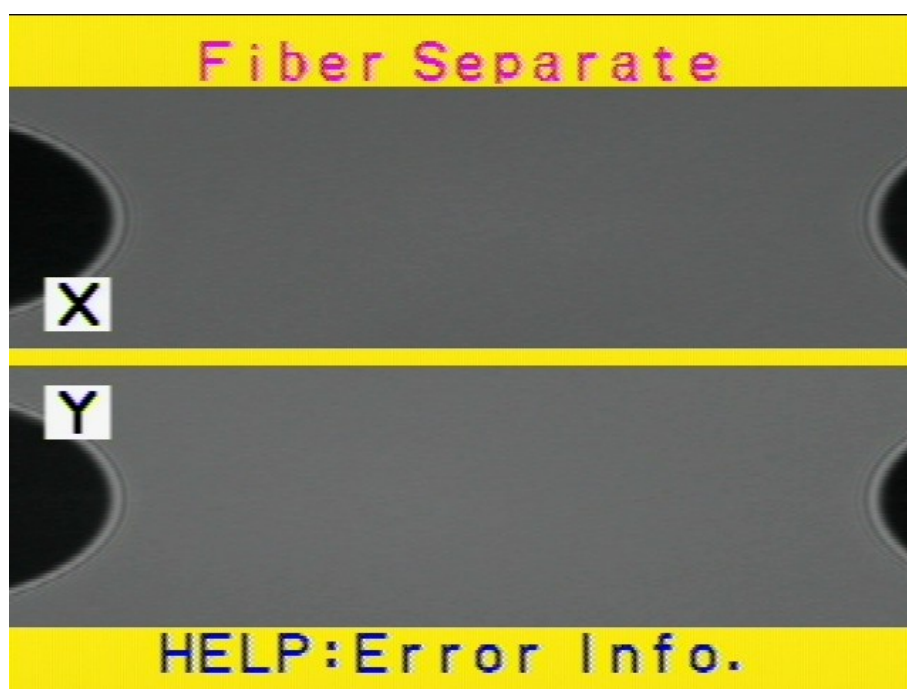
### 7.3 Nastavení svářečky

Pokud je nastaven svařovací výboj na nízkou úroveň, nedojde k plnohodnotnému svaru a protilehlé konce optických vláken se k sobě pouze jakoby přilepí. Takovýto svar je nevhodný pro další použití. Je velmi křehký, často se rozlomí už při vyjmutí svařených konců vláken z přístroje. Chybové vyhodnocení svářečky je na obrázku 7.5.



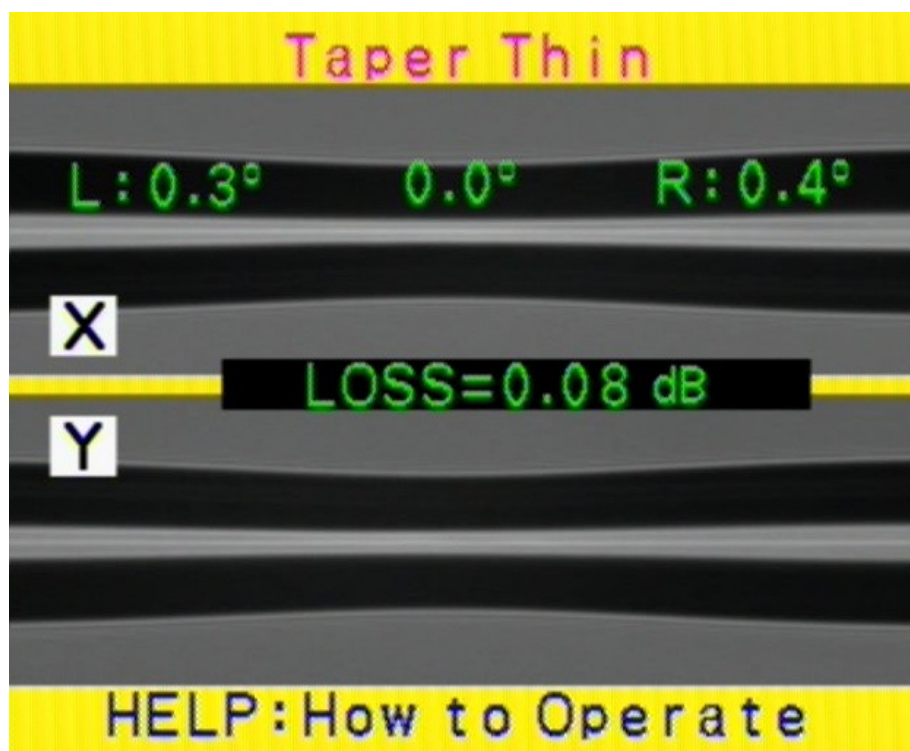
**Obr. 7.5:** Chybová hláška o bublině ve svaru

Pokud je naopak svařovací výboj nastaven na velmi vysokou úroveň, budou oba konce optických vláken upáleny a ke svaru nedojde, jak je vidět na obrázku 7.6. Takto seškvařené konce je nutné odstranit a opět připravit nová zakončení vláken, aby bylo možné vlákna znovu použít.



**Obr. 7.6:** Chybová hláška o oddělení konců vláken

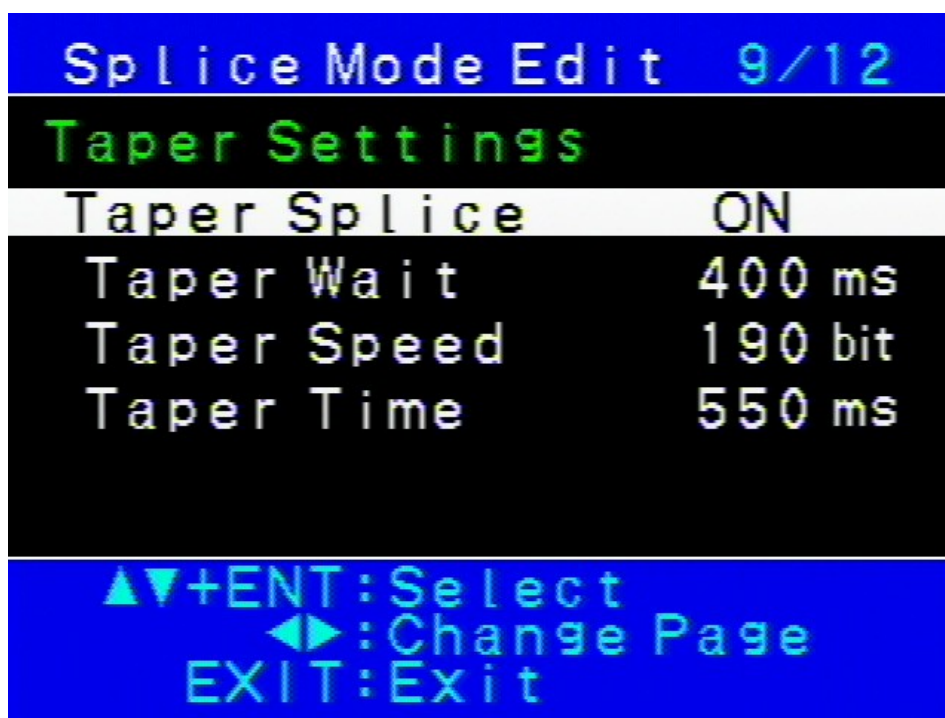
Svářečka detekuje i taperovaný svar jako chybný, takže po každém takto tvarovaném svaru se ukáže na LCD displeji chybová hláška jako na obrázku 7.7 v doprovodu se zvukovou signalizací.



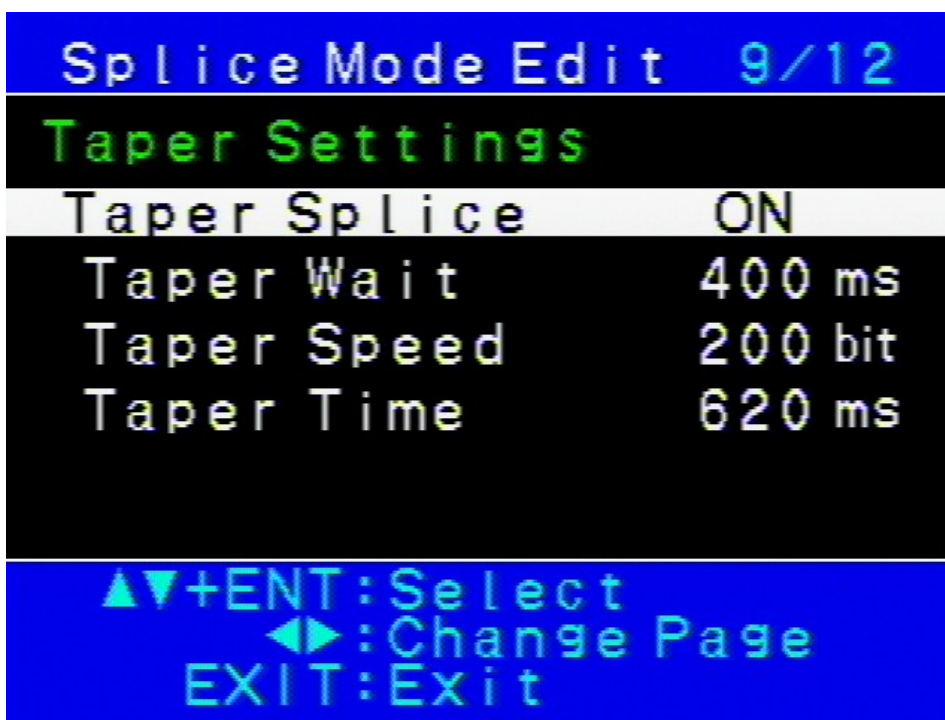
**Obr. 7.7:** Chybová hláška o zúženém svaru

---

Nastavení svářečky v části menu věnované taperování je uvedeno na obrázku 7.8 pro jednovidové vlákno a obrázek 7.9 zobrazuje nastavení svářečky pro mnohovidové taperování.



**Obr. 7.8:** Nastavení svářečky pro jednovidové tapery



**Obr. 7.9:** Nastavení svářečky pro jednovidové tapery

---

## 8 Výsledky měření

Tato kapitola se věnuje výsledkům naměřených během této diplomové práce. První měření zkoumají geometrii kónických zakončení jednotlivých vzorků vláken a ve druhém jsou uvedeny hodnoty útlumu na těchto svarech.

### 8.1 Naměřená geometrie kónických zakončení

Geometrický popis profilu vláken je zajímavý pro ověření reprodukovatelnosti těchto tvarů. Tato část se zvláště podívá na geometrii jednovidových a následně i mnohovidových vláken. Ke každému vzorku taperovaného vlákna je vyhotoven graf profilu měřeného vlákna uveden a k němu jsou přiřazeny rovnice čtyř funkcí  $a(x)$ ,  $b(x)$ ,  $c(x)$  a  $d(x)$ , které reprezentují čtyři křivky tvořící profil taperu.

#### 8.1.1 Geometrie na kónických zakončeních jednovidových vláken

Na obrázcích 8.1 a 8.2 jsou uvedeny grafy prvního a druhého taperu. Jsou téměř shodné, proto jsou další vzorky uvedeny v příloze A. Do všech funkcí reprezentujících křivky profilu jsou dosazeny hodnoty  $x=100, 150, 175, 200, 250$  a výsledné hodnoty funkcí v kontrolních bodech jsou pro každý vzorek uvedeny v tabulkách. Pro porovnání jsou zde uvedeny tabulky 8.1 a 8.2, ostatní tabulky jsou v taktéž v příloze A. Tyto kontrolní hodnoty jsou porovnávány v další kapitole.

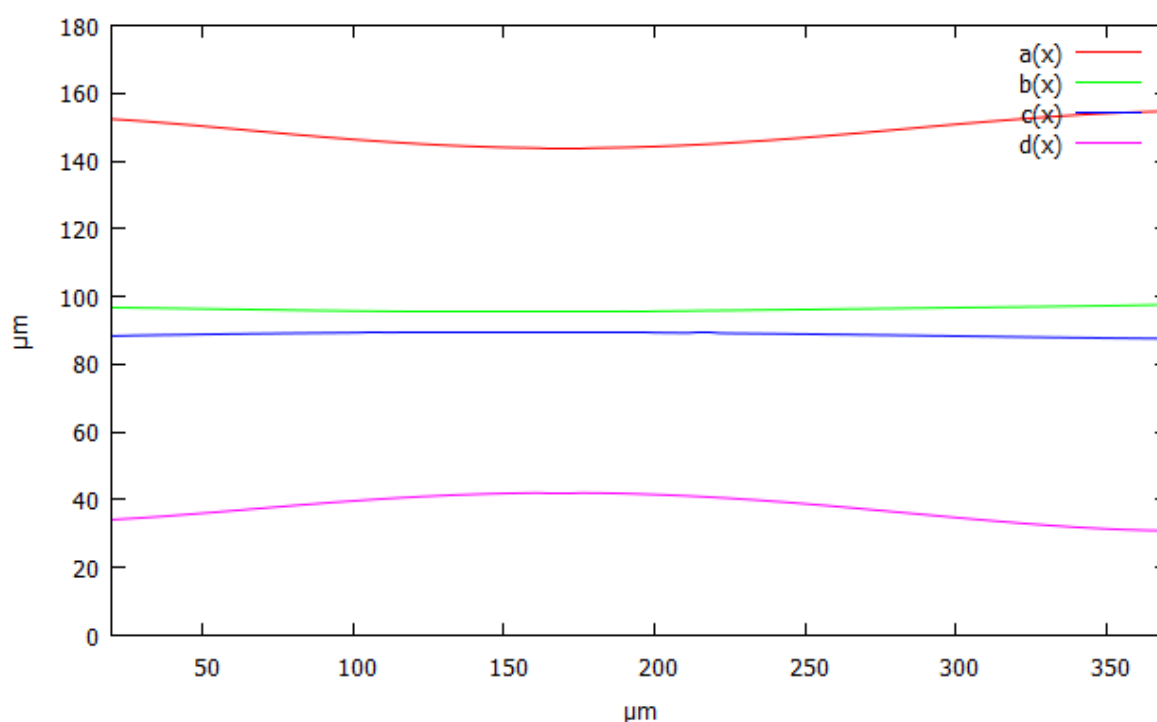
- Rovnice popisující křivky taperovaného jednovidového vlákna č. 1:

$$\begin{aligned} a(x) = & 7,79602757776185 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 - 1,43226285391452 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 \\ & + 7,31063523396535 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,00107421501551757 \cdot x^2 \\ & - 0,0198652792452471 \cdot x + 153,154717316796 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b(x) = & 5,73133221147333 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 - 5,9937982926199 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & + 2,17758673220394 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 2,70352043777894 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 \\ & + 0,000202828441270729 \cdot x + 96,8061000951189 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c(x) = & 6,03684897996382 \cdot 10^{-13} \cdot x^5 - 2,62616169349988 \cdot 10^{-10} \cdot x^4 \\ & + 5,69261896205366 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 - 7,37852942093511 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 \\ & + 0,0203443089006015 \cdot x + 87,9952870087529 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d(x) = & -4,37627457682059 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 + 1,13307376198754 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 \\ & - 6,43287505984751 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 9,86020757751232 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 \\ & + 0,0169992036457084 \cdot x + 33,4559246170403 \end{aligned}$$



Obr. 8.1: Graf zobrazující profil taperovaného jednovidového vlákna č. 1

---

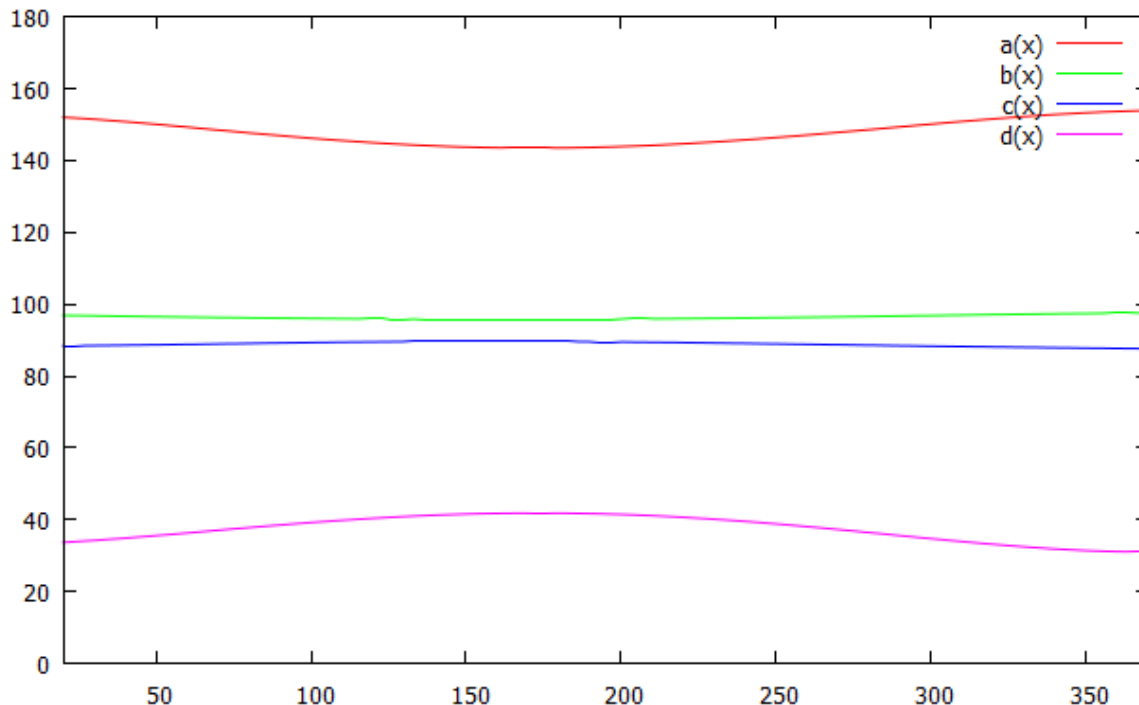
- **Rovnice popisující křivky taperovaného jednovidového vlákna č. 2:**

$$\begin{aligned} a(x) = & 8,69452903107435 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 - 1,51858283328732 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 \\ & + 7,6748687447716 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,00116316817734237 \cdot x^2 \\ & - 0,0106192000710796 \cdot x + 152,596186180721 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b(x) = & -1,31022634886216 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 + 6,77044616968318 \cdot 10^{-10} \cdot x^4 \\ & - 5,72681488908986 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 + 3,99151395078443 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 \\ & - 0,0157087740030666 \cdot x + 97,1792866285585 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c(x) = & -5,24042614101346 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 + 6,08352376588071 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & - 2,44188368692805 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 3,50244189454896 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 \\ & - 0,00751388493947869 \cdot x + 88,4198105198571 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d(x) = & 7,63180682061836 \cdot 10^{-13} \cdot x^5 + 6,87475479042367 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & - 5,14686318399593 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 8,51222128743313 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 \\ & + 0,0220222890145562 \cdot x + 32,9356779415106 \end{aligned}$$



Obr. 8.2: Graf zobrazující profil taperovaného jednovidového vlákna č. 2

- 
- **Kontrolní body pro jednovířová taperovaná vlákna:**

**Tabulka č. 8.1:** Naměřené hodnoty funkcí v kontrolních bodech vzorku 1

<b>Vzorek 1</b>	<b>a(x)</b>	<b>b(x)</b>	<b>c(x)</b>	<b>d(x)</b>
<b>100</b>	146,3824	95,75838	89,32857	39,67249
<b>150</b>	144,0197	95,50382	89,49178	41,88418
<b>175</b>	143,8074	95,55173	89,45373	42,06019
<b>200</b>	144,2767	95,69723	89,34114	41,56237
<b>250</b>	146,9442	96,16833	88,92295	38,80534

**Tabulka č. 8.2:** Naměřené hodnoty funkcí v kontrolních bodech vzorku 2

<b>Vzorek 2</b>	<b>a(x)</b>	<b>b(x)</b>	<b>c(x)</b>	<b>d(x)</b>
<b>100</b>	146,1458	96,00489	89,28493	39,19837
<b>150</b>	143,7071	95,77104	89,6137	41,55915
<b>175</b>	143,4327	95,76568	89,5897	41,84732
<b>200</b>	143,8295	95,83999	89,44843	41,45794
<b>250</b>	146,3343	96,21716	88,92333	38,8227

### 8.1.2 Geometrie na kónických zakončeních mnohovidových vláken

Na obrázcích 8.3 a 8.4 jsou uvedeny grafy prvního a druhého taperu. Jsou téměř shodné, proto jsou další vzorky uvedeny v příloze B. Kontrolní body jsou pro každý vzorek také uvedeny v tabulkách v příloze B. V této části jsou uvedeny pro porovnání tabulky 8.3 a 8.4. Tyto hodnoty jsou porovnávány v další kapitole.



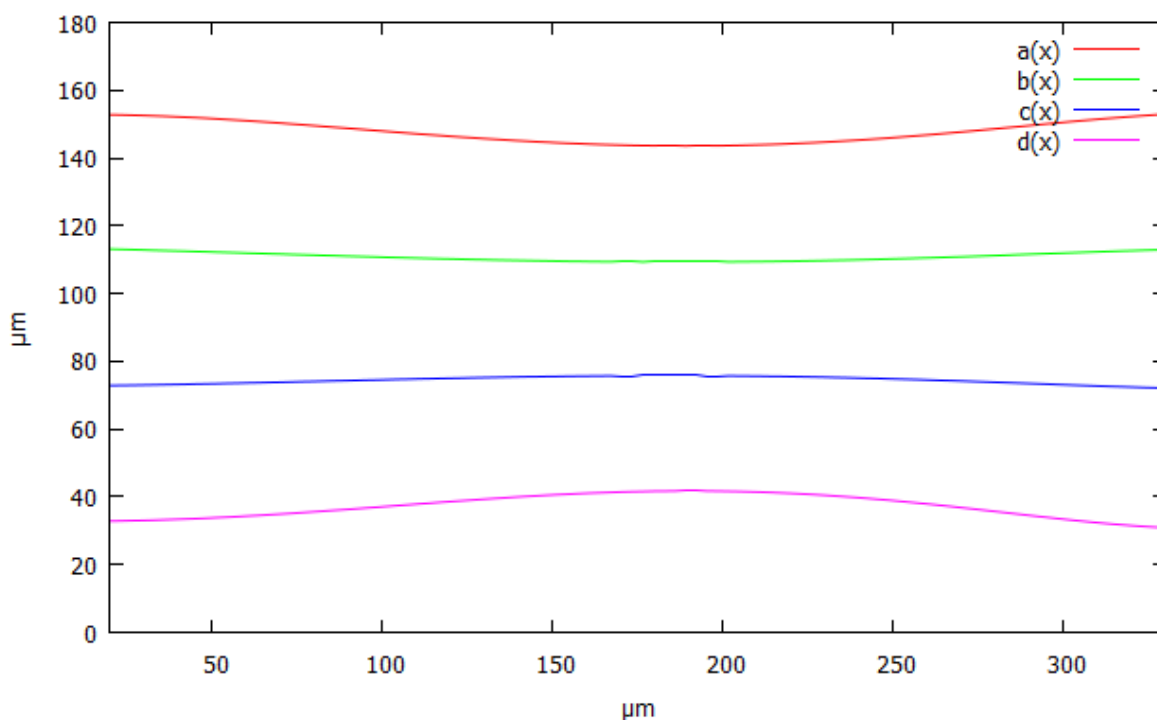
- Rovnice popisující křivky taperovaného mnohovidového vlákna č. 1:

$$\begin{aligned} a(x) = & -1,40594794670943 \cdot 10^{-11} \cdot x^5 + 1,51448436702428 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & + 4,39408717980319 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,00119196418710156 \cdot x^2 \\ & + 0,0279304742058299 \cdot x + 152,677926175585 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b(x) = & -8,58925866917298 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 + 4,72092991836845 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & - 2,63904907497635 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 - 4,74396693772084 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 \\ & - 0,0256119270290037 \cdot x + 113,666950305545 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c(x) = & 7,2437724712998 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 - 3,47793185230909 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & - 2,25412316654544 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 + 0,000164311328375878 \cdot x^2 \\ & + 0,00775092962970126 \cdot x + 72,6352537580529 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d(x) = & 4,31167664097239 \cdot 10^{-11} \cdot x^5 - 2,51261865375978 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 \\ & + 2,11107437174329 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 4,92153842373187 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 \\ & - 0,00625597116487424 \cdot x + 32,7436376010986 \end{aligned}$$



Obr. 8.3: Profil taperovaného mnohovidového vlákna č. 1

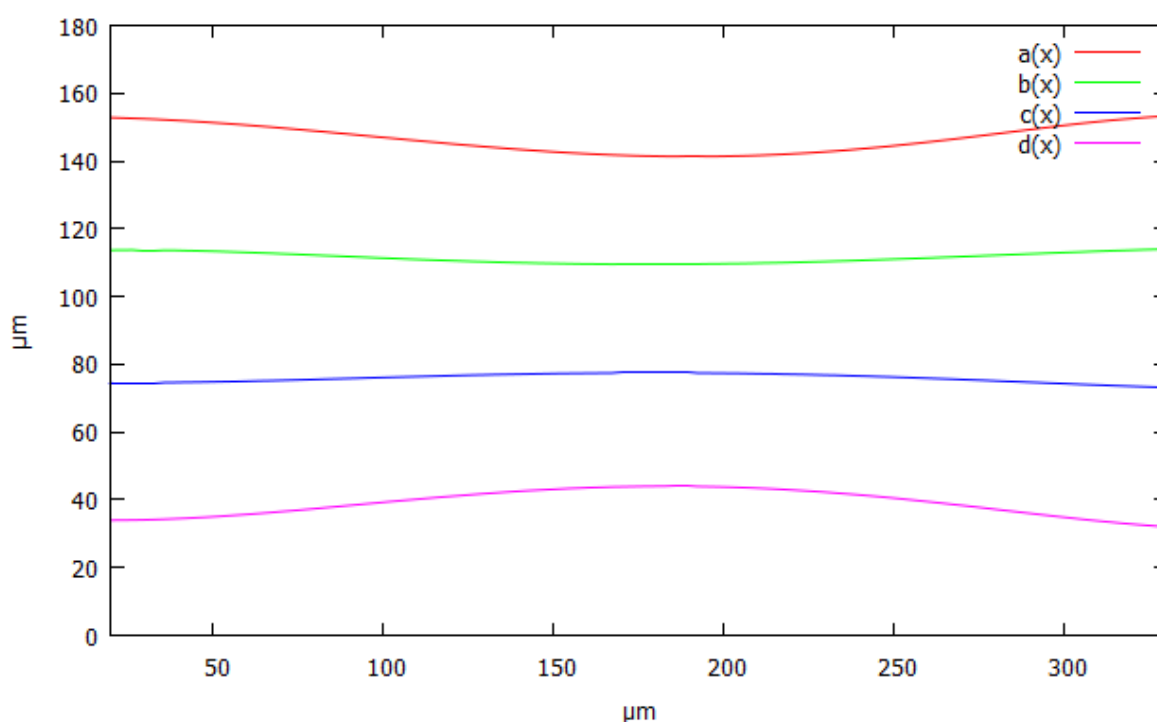
- Rovnice popisující křivky taperovaného mnohovidového vlákna č. 2:

$$\begin{aligned} a(x) = & -4,18927509174982 \cdot 10^{-11} \cdot x^5 + 2,22137164082825 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 \\ & - 5,11325427011487 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 - 0,000743386207939752 \cdot x^2 \\ & - 0,000124569682981916 \cdot x + 153,127572425287 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b(x) = & 1,21148778819967 \cdot 10^{-11} \cdot x^5 - 1,69180448277551 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 \\ & + 7,95136616423498 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,00138273053163298 \cdot x^2 \\ & + 0,0576606552324794 \cdot x + 113,042487852545 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c(x) = & -5,30208998620219 \cdot 10^{-13} \cdot x^5 + 4,90882184594018 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & - 3,55434071032693 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 0,000735829846521793 \cdot x^2 \\ & - 0,0312864342545917 \cdot x + 74,9472395276921 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d(x) = & 1,1642629584858 \cdot 10^{-11} \cdot x^5 + 4,34877634420137 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & - 7,73615033616818 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 0,00183371459923521 \cdot x^2 \\ & - 0,064713759382139 \cdot x + 34,5928644842708 \end{aligned}$$



Obr. 8.4: Profil taperovaného mnohovidového vlákna č. 2

- 
- **Kontrolní body pro mnohovidová taperovaná vlákna:**

**Tabulka č. 8.3:** Naměřené hodnoty funkcí v kontrolních bodech vzorku 1

<b>Vzorek 1</b>	<b>a(x)</b>	<b>b(x)</b>	<b>c(x)</b>	<b>d(x)</b>
<b>100</b>	147,9563	110,7537	74,55269	37,0692
<b>150</b>	144,5774	109,6048	75,5235	40,55763
<b>175</b>	143,7242	109,3356	75,74264	41,54627
<b>200</b>	143,6623	109,3407	75,70791	41,66266
<b>250</b>	146,0064	110,2287	74,8087	38,88185

**Tabulka č. 8.4:** Naměřené hodnoty funkcí v kontrolních bodech vzorku 2

<b>Vzorek 2</b>	<b>a(x)</b>	<b>b(x)</b>	<b>c(x)</b>	<b>d(x)</b>
<b>100</b>	148,9724	111,362	73,10813	36,27379
<b>150</b>	144,7214	109,7712	74,25937	40,12055
<b>175</b>	143,5573	109,5225	74,47477	40,95413
<b>200</b>	143,4129	109,6842	74,37287	40,79318
<b>250</b>	146,5068	111,0219	73,23573	37,5014

## 8.2 Naměřený útlum na kónických profilech

Taperování optických vláken narušuje jejich původní geometrii a to ovlivňuje různé parametry. Tato část kapitoly se zaměřuje na naměřené hodnoty útlumu na jednotlivých vzorcích taperů. Každý vzorek byl proměřen desetkrát, aby šlo o věrohodné měření. Tyto hodnoty budou v další kapitole statisticky porovnány.

### 8.2.1 Útlum na jednovidových vláknech

V tabulce 8.5 jsou uvedeny hodnoty útlumu na taperovaných vzorcích 1 a 2. Ostatní vzorky jsou uvedeny v tabulkách v příloze C. Tabulka 8.6 zobrazuje průměrnou hodnotu útlumu všech jednovidových taperů. S těmito hodnotami se bude pracovat v další kapitole.

**Tab. 8.5:** Hodnoty útlumu měřených na jednovidových vláknech č. 1 a 2

PROFIL 1	A (dB)	
Měření	λ = 1310 nm	λ = 1550 nm
1	0,36	0,31
2	0,38	0,33
3	0,35	0,29
4	0,38	0,32
5	0,39	0,35
6	0,37	0,34
7	0,34	0,32
8	0,39	0,34
9	0,41	0,35
10	0,38	0,33

PROFIL 2	A (dB)	
Měření	λ = 1310 nm	λ = 1550 nm
1	0,34	0,29
2	0,35	0,29
3	0,34	0,28
4	0,33	0,33
5	0,36	0,31
6	0,37	0,35
7	0,32	0,32
8	0,31	0,34
9	0,37	0,35
10	0,36	0,33

Průměr	0,375	0,328
--------	-------	-------

Průměr	0,345	0,319
--------	-------	-------

**Tab. 8.6:** Průměrná hodnota útlumu měřeného na jednovidových vláknech

PROFIL	A (dB)	
	$\lambda = 1310 \text{ nm}$	$\lambda = 1550 \text{ nm}$
1	0,375	0,328
2	0,345	0,319
3	0,314	0,257
4	0,308	0,288
5	0,327	0,305
6	0,293	0,272
7	0,336	0,289
8	0,32	0,293
9	0,353	0,326
10	0,313	0,283
Průměr	0,328	0,296

## 8.2.2 Útlum na mnohovidových vláknech

V tabulce 8.7 jsou uvedeny hodnoty útlumu na taperovaných vzorcích 1 a 2. Ostatní vzorky jsou uvedeny v tabulkách v příloze D. Tabulka 8.8 zobrazuje průměrnou hodnotu útlumu všech mnohovidových taperů. S těmito hodnotami se bude pracovat v další kapitole.

**Tab. 8.7:** Hodnoty útlumu měřených na mnohovidových vláknech č. 1 a 2

PROFIL 1	A (dB)		PROFIL 2	A (dB)	
Měření	$\lambda = 850 \text{ nm}$	$\lambda = 1300 \text{ nm}$	Měření	$\lambda = 850 \text{ nm}$	$\lambda = 1300 \text{ nm}$
1	0,85	0,51	1	0,78	0,47
2	0,84	0,49	2	0,79	0,49
3	0,87	0,52	3	0,81	0,51
4	0,87	0,51	4	0,82	0,48
5	0,86	0,5	5	0,79	0,49
6	0,86	0,51	6	0,76	0,46
7	0,84	0,54	7	0,76	0,44
8	0,87	0,52	8	0,78	0,49
9	0,87	0,53	9	0,82	0,47
10	0,86	0,54	10	0,83	0,48
Průměr	0,859	0,517	Průměr	0,794	0,478

**Tab. 8.8:** Průměrná hodnota útlumu měřeného na mnohovidových vláknech

	A (dB)	
Vzorek	$\lambda = 850 \text{ nm}$	$\lambda = 1300 \text{ nm}$
1	0,859	0,517
2	0,794	0,478
3	0,716	0,466
4	0,670	0,448
5	0,658	0,416
6	0,728	0,513
Průměr	0,738	0,473

---

## 9 Statistika měření

Tato kapitola se věnuje statistickému porovnání naměřených hodnot z předchozí kapitoly.

### 9.1 Vyhodnocení geometrických parametrů jednovíkových vláken

Z naměřených hodnot se vytvoří průměr a vypočítá se jeho směrodatná odchylka pro každý kontrolní bod. Tabulka 9.1 obsahuje tyto hodnoty pro kontrolní bod  $x=100$ . Ostatní tabulky s dalšími kontrolními body jsou v příloze E. Tabulky 9.2 – 9.5 zobrazují průměrné hodnoty s jejich směrodatnými odchylkami pro jednotlivé funkce. Tabulka 9.6 zobrazuje velikost relativních chyb pro průměrné hodnoty daných funkcí v kontrolních bodech.

**Tabulka č. 9.1:** Průměrné hodnoty funkcí a jejich odchylka v bodě  $x=100$

Vzorek	a(x)	b(x)	c(x)	d(x)
1	146,3824	95,75838	89,32857	39,67249
2	146,1458	96,00489	89,28493	39,19837
3	145,2046	95,88106	89,53165	40,41969
4	145,631	96,20809	89,12544	39,76111
5	146,2223	95,74102	89,50981	39,68796
6	146,2585	96,08412	89,38898	39,6387
7	146,1397	95,70717	89,21334	39,42797
8	145,1996	95,79562	90,28651	40,57848
9	146,2478	95,57549	89,19476	39,83897
10	145,2186	95,72608	89,21152	40,8021

Průměrná hodnota	145,865	95,84819	89,40755	39,90258
Směrodatná odchylka	$\pm 0,469305$	$\pm 0,185015$	$\pm 0,31954$	$\pm 0,494696$

**Tabulka č. 9.2:** Průměrné hodnoty a jejich směrodatné odchylky pro funkci  $a(x)$

x	$\bar{a}_{(x)} \pm \delta_{(x)}$
100	$145,865 \pm 0,469305$
150	$143,648 \pm 0,255836$
175	$143,538 \pm 0,22574$
200	$144,116 \pm 0,322511$
250	$146,9607 \pm 0,537642$

**Tabulka č. 9.3:** Průměrné hodnoty a jejich směrodatné odchylky pro funkci  $b(x)$

x	$\bar{\varnothing}_{(x)} \pm \delta_{(x)}$
100	$95,84819 \pm 0,185015$
150	$95,6537 \pm 0,133581$
175	$95,70385 \pm 0,146734$
200	$95,844 \pm 0,182361$
250	$96,32906 \pm 0,265023$

**Tabulka č. 9.4:** Průměrné hodnoty a jejich směrodatné odchylky pro funkci  $c(x)$

x	$\bar{\varnothing}_{(x)} \pm \delta_{(x)}$
100	$89,40755 \pm 0,31954$
150	$89,53593 \pm 0,12698$
175	$89,45256 \pm 0,186853$
200	$89,27545 \pm 0,33242$
250	$88,70093 \pm 0,606135$

**Tabulka č. 9.5:** Průměrné hodnoty a jejich směrodatné odchylky pro funkci  $d(x)$

x	$\bar{\varnothing}_{(x)} \pm \delta_{(x)}$
100	$39,89258 \pm 0,494696$
150	$41,98532 \pm 0,23771$
175	$42,04615 \pm 0,193686$
200	$41,41727 \pm 0,319426$
250	$38,44275 \pm 0,590468$

$$\varnothing_{r(x)} = \frac{\delta_{(x)}}{\bar{\varnothing}_{(x)}} \cdot 100 \quad (10)$$

Vzorec pro výpočet relativní chyby průměrné hodnoty v kontrolním bodu

Kde:

$\varnothing_{r(x)}$  je relativní chyba průměrné hodnoty v bodě x; [%]

$\delta_{(x)}$  je směrodatná odchylka od průměrné hodnoty v bodě x; [-]

$\bar{\varnothing}_{(x)}$  je průměrná hodnota v kontrolním bodu x; [-]

$$\varnothing_{r(100)} = \frac{0,469305}{145,865} \cdot 100 = \underline{\underline{0,32173 \%}}$$

Příklad výpočtu relativní chyby pro funkci  $a(100)$

**Tabulka 9.6:** Velikost relativních chyb pro průměrné hodnoty daných funkcí v kontrolních bodech

x	Ør [%]			
	a(x)	b(x)	c(x)	d(x)
<b>100</b>	0,321739	0,193029	0,357397	1,23976
<b>150</b>	0,178099	0,139651	0,14182	0,56604
<b>175</b>	0,157268	0,153321	0,208885	0,460542
<b>200</b>	0,223786	0,190269	0,372353	0,771053
<b>250</b>	0,365841	0,275123	0,683347	1,535567

## 9.2 Vyhodnocení geometrických parametrů mnohovidových vláken

Z naměřených hodnot se vytvoří průměr a vypočítá se jeho směrodatná odchylka pro každý kontrolní bod. Tabulka 9.7 obsahuje tyto hodnoty pro kontrolní bod  $x=100$ . Ostatní tabulky s dalšími kontrolními body jsou v příloze E. Tabulky 9.8 – 9.11 zobrazují průměrné hodnoty s jejich směrodatnými odchylkami pro jednotlivé funkce. Tabulka 9.12 zobrazuje velikost relativních chyb pro průměrné hodnoty daných funkcí v kontrolních bodech.

**Tabulka 9.7:** : Průměrné hodnoty funkcí a jejich odchylka v bodě  $x=100$

Vzorek	a(x)	b(x)	c(x)	d(x)
<b>1</b>	147,9563	110,7537	74,55269	37,0692
<b>2</b>	148,9724	111,362	73,10813	36,27379
<b>3</b>	146,8474	111,6549	75,27462	37,93634
<b>4</b>	148,6388	115,1382	72,51002	38,58424
<b>5</b>	147,4195	111,2791	73,65794	37,51959
<b>6</b>	147,5153	111,533	73,01092	37,34566

<b>Průměr</b>	147,8916	111,9535	73,68572	37,4548
<b>Směrodatná</b>	0,728629	1,452155	0,952911	0,714971



---

**Tabulka č. 9.8:** Průměrné hodnoty a jejich směrodatné odchylky pro funkci  $a(x)$

x	$\bar{\phi} \pm \delta$
100	$147,8916 \pm 0,728629$
150	$144,3704 \pm 0,388484$
175	$143,4537 \pm 0,370166$
200	$143,3724 \pm 0,345677$
250	$145,898 \pm 0,343975$

**Tabulka č. 9.9:** Průměrné hodnoty a jejich směrodatné odchylky pro funkci  $b(x)$

x	$\bar{\phi} \pm \delta$
100	$111,9535 \pm 1,452155$
150	$110,3921 \pm 0,683748$
175	$109,9182 \pm 0,420411$
200	$109,9654 \pm 0,405609$
250	$110,9133 \pm 0,325249$

**Tabulka č. 9.10:** Průměrné hodnoty a jejich směrodatné odchylky pro funkci  $c(x)$

x	$\bar{\phi} \pm \delta$
100	$73,68572 \pm 0,952911$
150	$74,61702 \pm 0,778373$
175	$74,80461 \pm 0,783407$
200	$74,73717 \pm 0,835049$
250	$73,81388 \pm 1,001647$

**Tabulka č. 9.11:** Průměrné hodnoty a jejich směrodatné odchylky pro funkci  $d(x)$

x	$\bar{\phi} \pm \delta$
100	$37,4548 \pm 0,714971$
150	$40,43294 \pm 0,232139$
175	$41,18397 \pm 0,274319$
200	$41,09013 \pm 0,32308$
250	$38,31459 \pm 0,420846$

$$\varnothing_{r(100)} = \frac{0,728629}{147,8916} \cdot 100 = \underline{\underline{0,49267 \%}}$$

Příklad výpočtu relativní chyby pro funkci  $a(100)$  dle vzorce (10)

**Tabulka 9.12:** Velikost relativních chyb pro průměrné hodnoty daných funkcí v kontrolních bodech

x	Ør [%]			
	a(x)	b(x)	c(x)	d(x)
<b>100</b>	0,492678	1,297106	1,293209	1,908891
<b>150</b>	0,269089	0,619381	1,043157	0,574133
<b>175</b>	0,258038	0,382476	1,047272	0,666081
<b>200</b>	0,241104	0,368852	1,117314	0,786272
<b>250</b>	0,235764	0,293246	1,35699	1,098396

### 9.3 Vyhodnocení optického útlumu na jednovíkových taperech

**Tabulka 9.13:** Průměrná hodnota útlumu a jeho směrodatná chyba

PROFIL	A (dB)	
	λ = 1310 nm	λ = 1550 nm
<b>1</b>	0,375	0,328
<b>2</b>	0,345	0,319
<b>3</b>	0,314	0,257
<b>4</b>	0,308	0,288
<b>5</b>	0,327	0,305
<b>6</b>	0,293	0,272
<b>7</b>	0,336	0,289
<b>8</b>	0,32	0,293
<b>9</b>	0,353	0,326
<b>10</b>	0,313	0,283

<b>Průměr</b>	<b>0,328</b>	<b>0,296</b>
<b>Směrodatná chyba</b>	<b>0,023014</b>	<b>0,022186</b>

**Tabulka 9.14:** Průměrná hodnota útlumu a jeho směrodatná chyba

$\lambda$ [nm]	$A \pm \delta$ [dB]
<b>1310</b>	$0,3284 \pm 0,023014$
<b>1550</b>	$0,296 \pm 0,022186$

$$A_{r(\lambda)} = \frac{\delta A}{A} \cdot 100 [\%]$$

Vzorec pro výpočet relativní chyby průměrné hodnoty útlumu

$$A_{r(1310)} = \frac{0,023014}{0,328} \cdot 100 = \underline{\underline{7,0079 \%}}$$

Příklad výpočtu relativní chyby útlumu při vlnové délce 1310 nm

**Tabulka 9.15:** Velikost relativní chyby průměrné hodnoty útlumu pro jednovidová vlákna

$\lambda$ [nm]	$A_r$ [%]
<b>1310</b>	7,007889
<b>1550</b>	7,495129

## 9.4 Vyhodnocení optického útlumu na mnohovidových taperech

**Tabulka 9.16:** Průměrná hodnota útlumu a jeho směrodatná chyba

Vzorek	A(dB)	
	$\lambda = 850$ nm	$\lambda = 1300$ nm
<b>1</b>	0,859	0,517
<b>2</b>	0,794	0,478
<b>3</b>	0,716	0,466
<b>4</b>	0,67	0,448
<b>5</b>	0,658	0,416
<b>6</b>	0,728	0,513
<b>Průměr</b>	<b>0,7375</b>	<b>0,473</b>
<b>Směrodatná chyba</b>	<b>0,06998</b>	<b>0,035318</b>

---

**Tabulka 9.17:** Průměrná hodnota útlumu a jeho směrodatná chyba

$\lambda$ [nm]	$A \pm \delta$ [dB]
850	$0,7375 \pm 0,06998$
1300	$0,473 \pm 0,035318$

$$A_{r(850)} = \frac{0,06998}{0,7375} \cdot 100 = \underline{\underline{9,4881 \%}}$$

Příklad výpočtu relativní chyby útlumu při vlnové délce 850 nm

**Tabulka 9.18:** Velikost relativní chyby průměrné hodnoty útlumu pro mnohovidová vlákna

$\lambda$ [nm]	$A_r$ [%]
850	9,488862
1300	7,466724

---

## 10 Zhodnocení a závěr

Cílem této diplomové práce bylo realizovat kónická zakončení na různých typech optických vláken. Taperování probíhalo převážně na konvenčních jednovidových optických vláknech o rozměrech 9/125  $\mu\text{m}$ . Dále bylo pro porovnání vytvořeno i několik vzorků taperovaných svarů na mnohovidových vláknech o rozměrech 50/125  $\mu\text{m}$ .

Profil taperovaných vláken byl změněn. U jednovidových vláken má taper v oblasti pasu rozměry 6,2/101,5  $\mu\text{m}$ . Mnohovidová vlákna mají rozměr v pasu 35,1/102,3  $\mu\text{m}$ . Geometrie jednotlivých vzorků taperovaných vláken byla velmi podobná. Potvrzuje to velikost relativních chyb pro průměrné y-ové hodnoty vycházející z daných funkcí v kontrolních x-ových bodech, které se pohybovaly v mezi 0,14 % až 1,54 % u jednovidových vláken. Pro mnohovidová vlákna to potom bylo od 0,24 % po 1,91 %.

Útlum na vzorcích taperovaných jednovidových vláken se pohyboval kolem 0,328 dB pro vlnovou délku 1310 nm a 0,296 dB pro 1550 nm. Tato hodnota předčila očekávání, vezmeme-li v úvahu deformaci profilu vlákna. Taperovaný spoj se nechová jako útlumový člen, což je dobře. Relativní chyba průměrné hodnoty útlumu na jednovidových taperech dosahovala 7,01 % pro vlnovou délku 1310 nm a pro 1550 nm to potom bylo 7,50 %.

Na taperovaných svarech mnohovidových vláken dosahoval útlum hodnoty 0,738 dB pro vlnovou délku 850 nm a pro 1300 nm to byl útlum 0,473 dB. Tyto hodnoty jsou stále přijatelné, ale nejsou už tak příznivé jako hodnoty útlumu na jednovidových vláknech. Vyšší útlum svaru je dán technologií a příslušnou vlnovou délkou. Na mnohovidových taperech dosahovala relativní chyba průměrné hodnoty útlumu 9,49 % při vlnové délce 850 nm a 7,47 % při 1300 nm.

Relativní chyba průměrné hodnoty útlumu dosahovala mnohem větších hodnot, než jaké byly vypočteny při geometrii kónických zakončení v kontrolních bodech. Z toho důvodu je potřeba věnovat větší pozornost právě útlumu a při výrobě více kusů zavést selekci dle útlumu.

Pro dosažení lepšího přístupu evanescentní vlny k analytu by určitě bylo zajímavé taperovat mikrostrukturní optická vlákna (MOF). Plášťové otvory by zvětšily citlivost detekce kónicky zúženého optického vlákna.

Využití vláknové optiky v senzorice určitě pomůže dalšímu vývoji optoelektronických technologií a postupnému nahrazování konvenčních senzorů a měřidel, která jsou často velká, těžká a někdy i energeticky náročná.

---

## 11 Odkazy a literatura

- [1]. Novotný K.: *Optická komunikační technika*. Vydání třetí. Praha : ČVUT, 2007. 148 s.
- [2]. Kucharski M.; Dubský P.: *Měření přenosových parametrů optických vláken, kabelů a tras*. Praha : Mikrom, 1998. 141 s.
- [3]. Vanda J.: *Optoelektronika*. Ostrava, 2004. Výukový materiál. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [4]. *Fujikura PANDA fiber products and Basics of PM fibers*. s. 44.; Fujikura propriety: 916-1012-049-11. Dostupné z: [http://www.fujikura.co.jp/eng/products/tele/o\\_device/data/16pnb04.pdf](http://www.fujikura.co.jp/eng/products/tele/o_device/data/16pnb04.pdf)
- [5]. Zbořil O.: *Svařování atypických optických vláken*. Ostrava, 2010. 30 s. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra telekomunikační techniky. Dostupné z WWW: <[https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/78731/ZBO062\\_FEI\\_B2647\\_2601R013\\_2010.pdf?sequence=1](https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/78731/ZBO062_FEI_B2647_2601R013_2010.pdf?sequence=1)>
- [6]. Encyclopedia of Laser Physics and Technology: Tapered Fibers. DR. RÜDIGER PASCHOTTA. *RP Photonics Consulting GmbH* [online]. [cit. 2012-01-03]. Dostupné z: [http://www.rp-photonics.com/tapered\\_fibers.html](http://www.rp-photonics.com/tapered_fibers.html)
- [7]. Yin,S., Ruffin,P.B., Yu,F.T.S.: *Fiber Optic Sensors*. CRC Press, FL, USA, 2008, ISBN 978-1-4200-5365-4
- [8]. Morse,T.F., Mendez,A.: *Specialty Optical Fibers - Handbook*. Academia Press, San Diego, 2007, ISBN 978-0-12-369406-5

- 
- [9]. Matějec, V., Podrazký, O., Mrázek, J., Peterka, P., Hayer, M.: *"Tažení optických vláken v Ústavu fotoniky a elektroniky"*, *Jemná mechanika a optika*, Roč. 55, č.4 (2010), s. 107-110. Praha: Fyzikální ústav Akademie věd ČR, 2010. ISSN 0447-6441
- [10]. Martan, T.: *"Zúžená optická vlákna"*, *Jemná mechanika a optika*, Roč. 55, č.4 (2010), s. 111-114. Praha: Fyzikální ústav Akademie věd ČR, 2010. ISSN 0447-6441
- [11]. Martan T., Kaňka J., Podrazký O., Kašík I., Matějec V.: Kónicky zúžená optická vlákna. *Optické komunikace OK 2007*, 89-97 (2007).
- [12]. DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky*. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 154 s. ISBN 80-730-0184-5.
- [13]. RP- Photonics: *Single-mode Fibers*. [online]. [cit. 2013-04-01]. Dostupné z: [http://www.rp-photonics.com/single\\_mode\\_fibers.html](http://www.rp-photonics.com/single_mode_fibers.html)
- [14]. MARŠÁLEK, Leoš. *Optická vlákna: verze 2.1.3* [online]. 2006 [cit. 2013-05-01]. VŠB TU Ostrava FEI. Dostupné z: <http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>
- [15]. Technologie přenosu dat přes optická vlákna: PC Tuning. In: *PC Tuning* [online]. 22.1.2008. [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: [http://pctuning.tyden.cz/hardware/site-a-internet/9994-technologie\\_prenosu\\_dat\\_pres\\_opticka\\_vlakna?start=3](http://pctuning.tyden.cz/hardware/site-a-internet/9994-technologie_prenosu_dat_pres_opticka_vlakna?start=3)
- [16]. Kulhánek, P.: Hyperčočky. *ALDEBARAN BULLETIN* [online]. 2009, roč. 7, č. 20, s. 1-5. Internet: [http://www.aldebaran.cz/bulletin/2009\\_20\\_met.php](http://www.aldebaran.cz/bulletin/2009_20_met.php). ISSN 1214-1674.
-

---

## 12 Seznam příloh

Příloha A	Geometrie na kónických zakončeních jednovidových vláken
Příloha B	Geometrie na kónických zakončeních mnohovidových vláken
Příloha C	Útlum na jednovidových vláknech
Příloha D	Útlum na mnohovidových vláknech
Příloha E	Vyhodnocení geometrických parametrů jednovidových vláken
Příloha F	Vyhodnocení geometrických parametrů mnohovidových vláken



---

## Příloha A Geometrie na kónických zakončeních jednovidových vláken

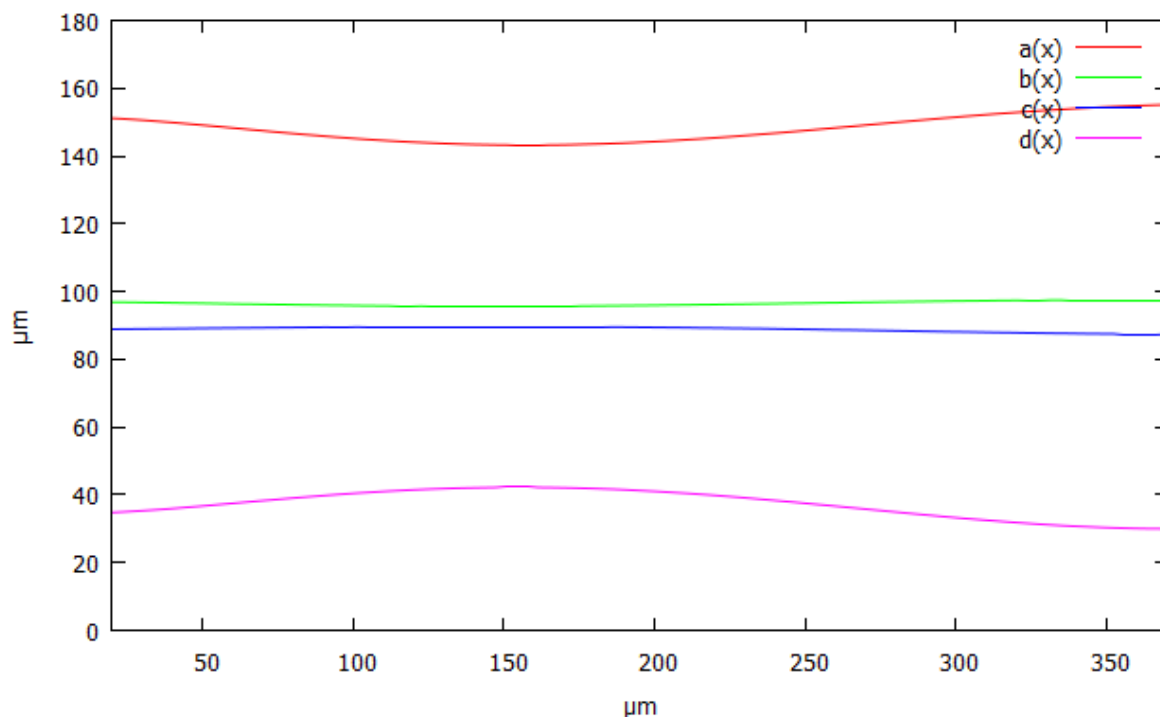
- Rovnice popisující křivky taperovaného jednovidového vlákna č. 3:

$$\begin{aligned}a(x) = & 2,01335783923429 \cdot 10^{-11} \cdot x^5 - 2,59673687293236 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 \\ & + 1,09831210201881 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 - 0,00150192920970684 \cdot x^2 \\ & - 0,000510588843213098 \cdot x + 151,68726739041\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}b(x) = & 4,25400858010853 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 - 5,11485768927441 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & + 1,99901002454902 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 2,44609182456412 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 \\ & - 0,00233846094846668 \cdot x + 97,0309335409253\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}c(x) = & 2,54055918708193 \cdot 10^{-13} \cdot x^5 + 7,13617315316993 \cdot 10^{-10} \cdot x^4 \\ & - 5,48818915064373 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 + 6,71715611653662 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 \\ & + 0,00577867743535772 \cdot x + 88,7569876494986\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}d(x) = & -1,58032571762908 \cdot 10^{-11} \cdot x^5 + 2,26415336688837 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 \\ & - 1,01076395449981 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 + 1,40687466598225 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 \\ & + 0,000943111400378962 \cdot x + 34,258153126714\end{aligned}$$



Obr. A.1: Profil taperovaného jednovidového vlákna č. 3

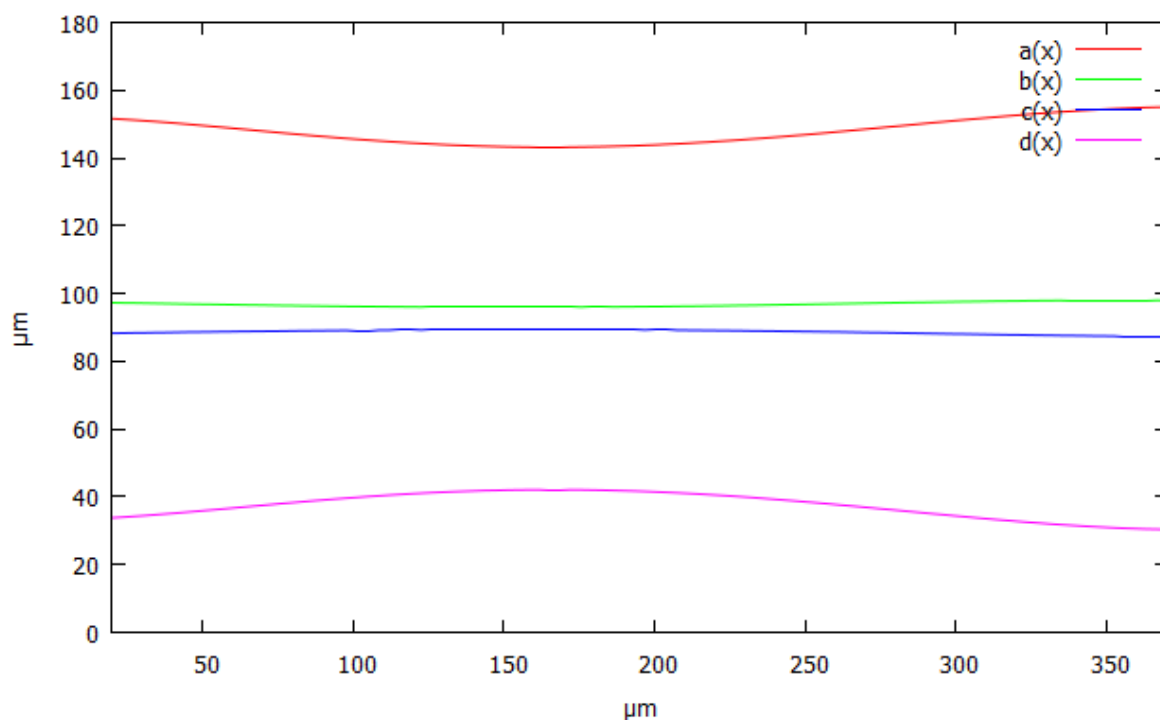
- Rovnice popisující křivky taperovaného jednovidového vlákna č. 4:

$$\begin{aligned} a(x) = & 1,15159407037103 \cdot 10^{-11} \cdot x^5 - 1,83180462565603 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 \\ & + 8,79156451969159 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,00128546322322567 \cdot x^2 \\ & - 0,00819050139266464 \cdot x + 152,229803636367 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b(x) = & 2,10303135201604 \cdot 10^{-13} \cdot x^5 - 1,50224448112159 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & + 8,75738228411216 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 - 9,62922475611361 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 \\ & - 0,0109679007257433 \cdot x + 97,5401868572775 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c(x) = & 2,59412224538688 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 - 1,67841857257445 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & + 3,17126637877028 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 - 6,80059810814308 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 \\ & + 0,0165312502490129 \cdot x + 87,9771456055188 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d(x) = & -7,6796126547947 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 + 1,44002141853095 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 \\ & - 7,34863954384698 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 0,00105881146159474 \cdot x^2 \\ & + 0,021694788212741 \cdot x + 32,9889302147202 \end{aligned}$$



**Obr. A.2:** Profil taperovaného jednovidového vlákna č. 4

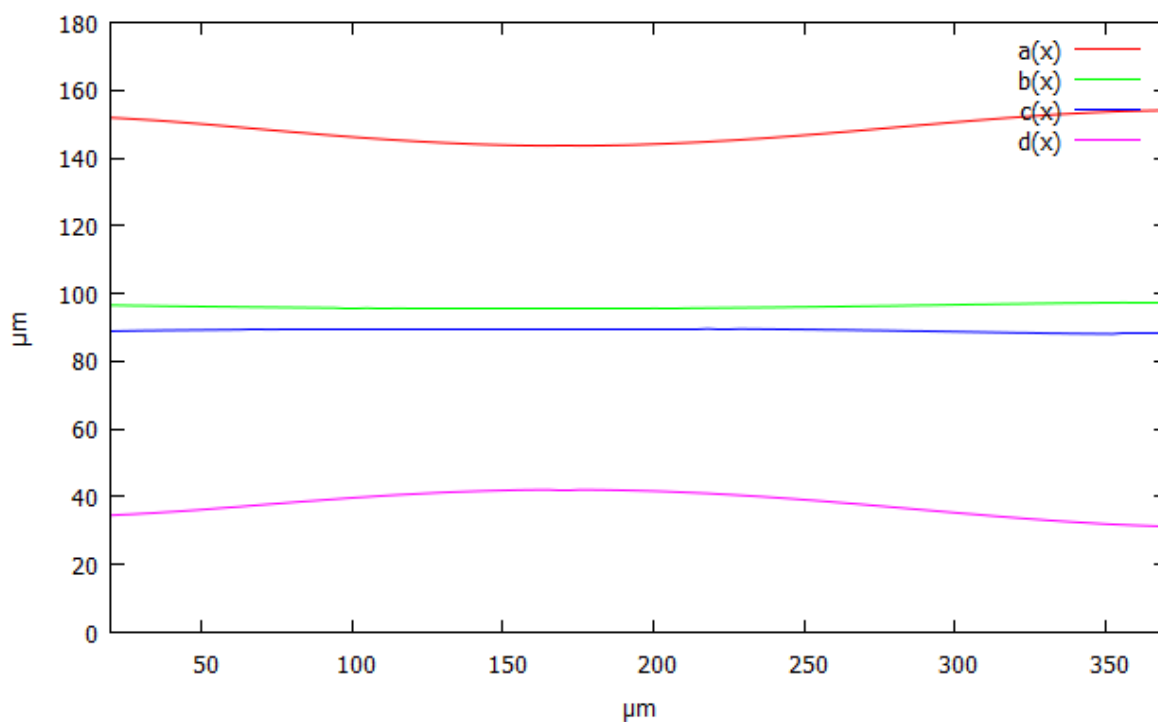
- Rovnice popisující křivky taperovaného jednovidového vlákna č. 5:

$$\begin{aligned} a(x) = & 9,03964266473841 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 - 1,6091823168429 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 \\ & + 8,16610857229924 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,00125809534225991 \cdot x^2 \\ & - 0,00224123839908629 \cdot x + 152,380039852416 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b(x) = & -3,53355749629285 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 + 2,77351816833517 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & - 7,68136584393321 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 + 1,43463932470934 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 \\ & - 0,0210251397335453 \cdot x + 96,9350108663695 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c(x) = & 8,23087320145163 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 - 7,3457831983231 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & + 2,31518146914418 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 3,49091780320328 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 \\ & + 0,029064100695626 \cdot x + 88,4314060822519 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d(x) = & -7,04322165932227 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 + 1,35355626585396 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 \\ & - 7,16024334853328 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 0,00112826422097995 \cdot x^2 \\ & + 0,00145482715408729 \cdot x + 34,1369522798492 \end{aligned}$$



**Obr. A.3:** Profil taperovaného jednovidového vlákna č. 5

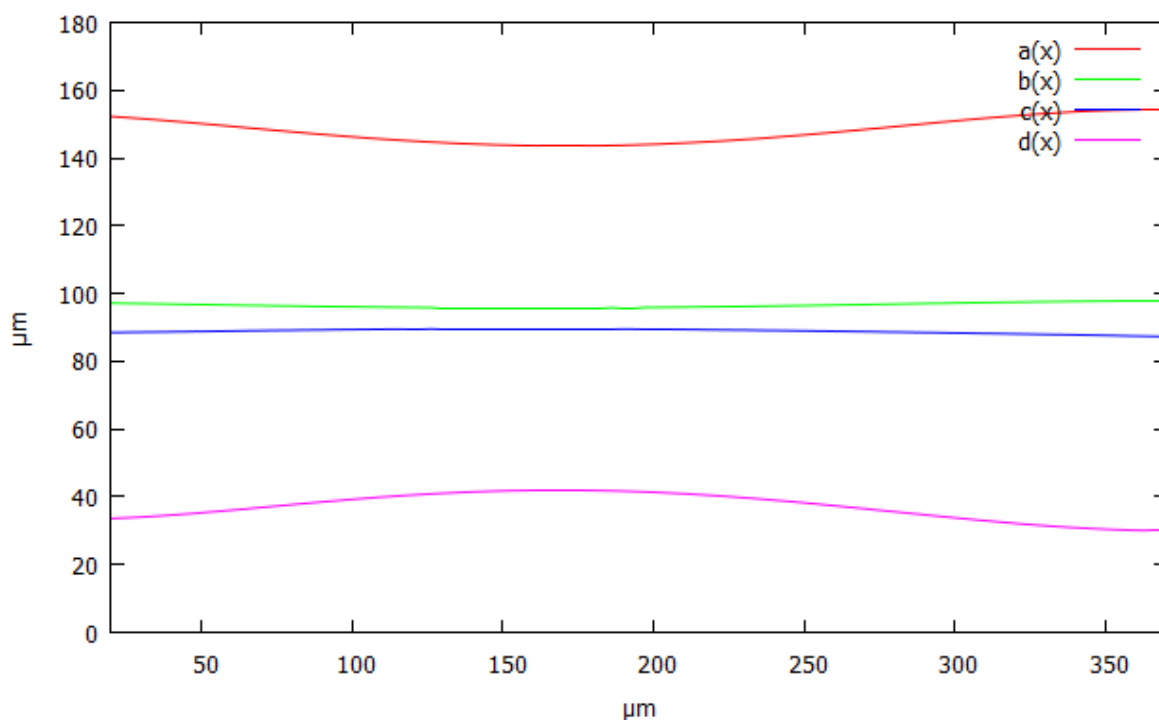
- Rovnice popisující křivky taperovaného jednovláknového vlákna č. 6:

$$\begin{aligned} a(x) = & 3,37200759977521 \cdot 10^{-13} \cdot x^5 - 8,19864606075994 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & + 5,56952348421174 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 8,66764583699997 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 \\ & - 0,0299434144435318 \cdot x + 153,167469374679 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b(x) = & 8,69222673296012 \cdot 10^{-13} \cdot x^5 - 1,89911760479911 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & + 9,7533096846689 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 - 1,16200802683077 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 \\ & - 0,00935665019333198 \cdot x + 97,3876794834971 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c(x) = & -4,00000323024388 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 + 4,34295314960909 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & - 1,65379576487037 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 2,07194506515062 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 \\ & + 0,00169241398221246 \cdot x + 88,4072945139587 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d(x) = & -9,93483950048661 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 + 1,84157746068767 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 \\ & - 9,55628297809605 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 0,00154106701723904 \cdot x^2 \\ & - 0,0177668919760716 \cdot x + 33,8187698616643 \end{aligned}$$



**Obr. A.4:** Profil taperovaného jednovláknového vlákna č. 6

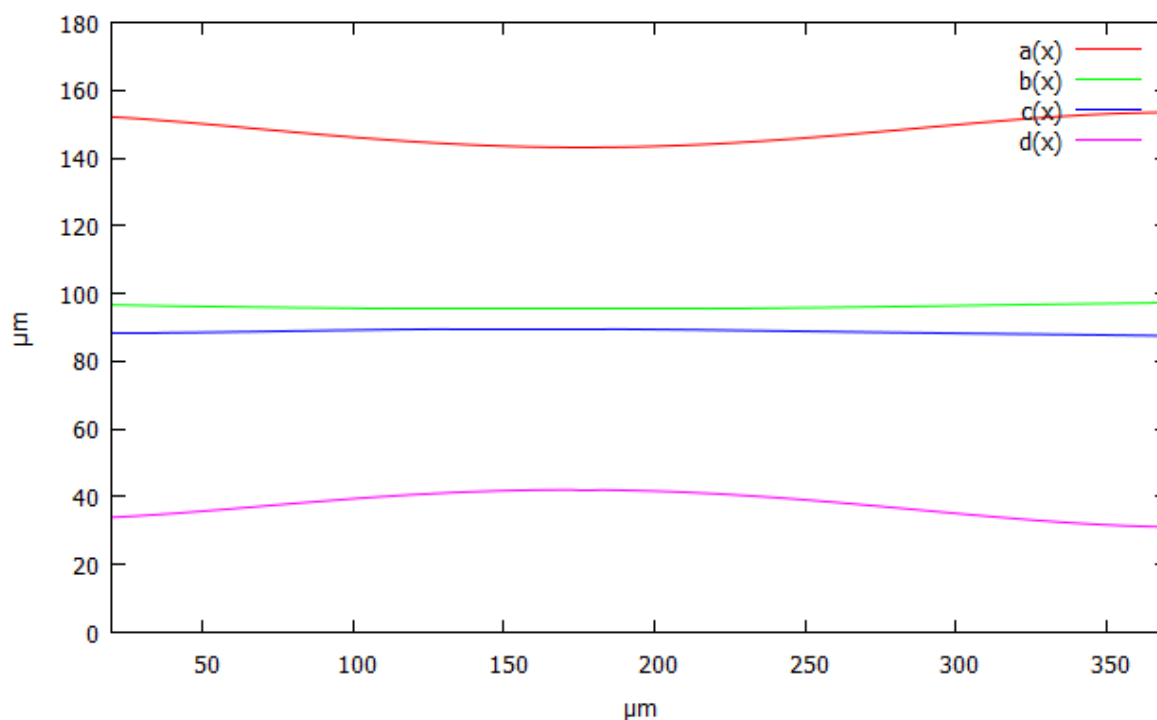
- Rovnice popisující křivky taperovaného jednovidového vlákna č. 7:

$$\begin{aligned} a(x) = & 3,03731273075257 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 - 1,03853398379285 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 \\ & + 6,30204633080971 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,00100645278301939 \cdot x^2 \\ & - 0,0196427862267122 \cdot x + 152,87465968985 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b(x) = & -2,74060984265821 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 + 2,18558346127388 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & - 6,20355301504343 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 + 1,29520132394729 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 \\ & - 0,0218585553255331 \cdot x + 97,0270320758583 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c(x) = & -9,15890243928227 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 + 1,00230724668241 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 \\ & - 3,88552774357618 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 5,82822339282651 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 \\ & - 0,0228412906458924 \cdot x + 88,6440542600401 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d(x) = & -4,11918042298754 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 + 1,12247229970225 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 \\ & - 6,54419050604197 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 0,00104880726298068 \cdot x^2 \\ & + 0,0104380415617602 \cdot x + 33,3590023873185 \end{aligned}$$



**Obr. A.5:** Profil taperovaného jednovidového vlákna č. 7

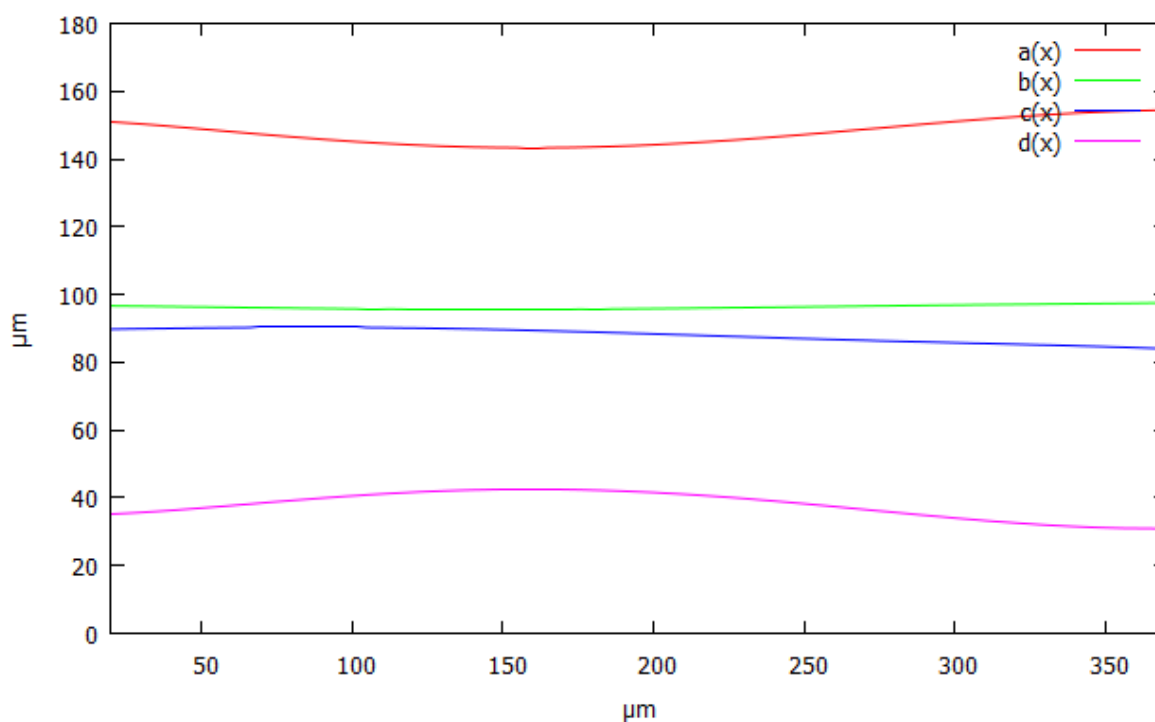
- Rovnice popisující křivky taperovaného jednovidového vlákna č. 8:

$$\begin{aligned} a(x) = & 1,08910202419073 \cdot 10^{-11} \cdot x^5 - 1,67500715068648 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 \\ & + 7,69745664220791 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,0010175424678106 \cdot x^2 \\ & - 0,0259899248196813 \cdot x + 151,842617595707 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b(x) = & 5,22670495258104 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 - 5,656224487338 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & + 2,09088190303633 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 2,61527739479836 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 \\ & + 0,00133624860480142x \cdot x + 96,699743466137 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c(x) = & -9,12964357323041 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 + 834802398332533 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & - 2,39923064128674 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 1,39053727064523 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 \\ & + 0,000139053727064523 \cdot x + 89,5247746188187 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d(x) = & -1,10551864425374 \cdot 10^{-11} \cdot x^5 + 1,85368563047655 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 \\ & - 8,97942497415263 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 0,00132199059286654 \cdot x^2 \\ & - 0,00191102071077986 \cdot x + 34,7859718209552 \end{aligned}$$



**Obr. A.6:** Profil taperovaného jednovidového vlákna č. 8

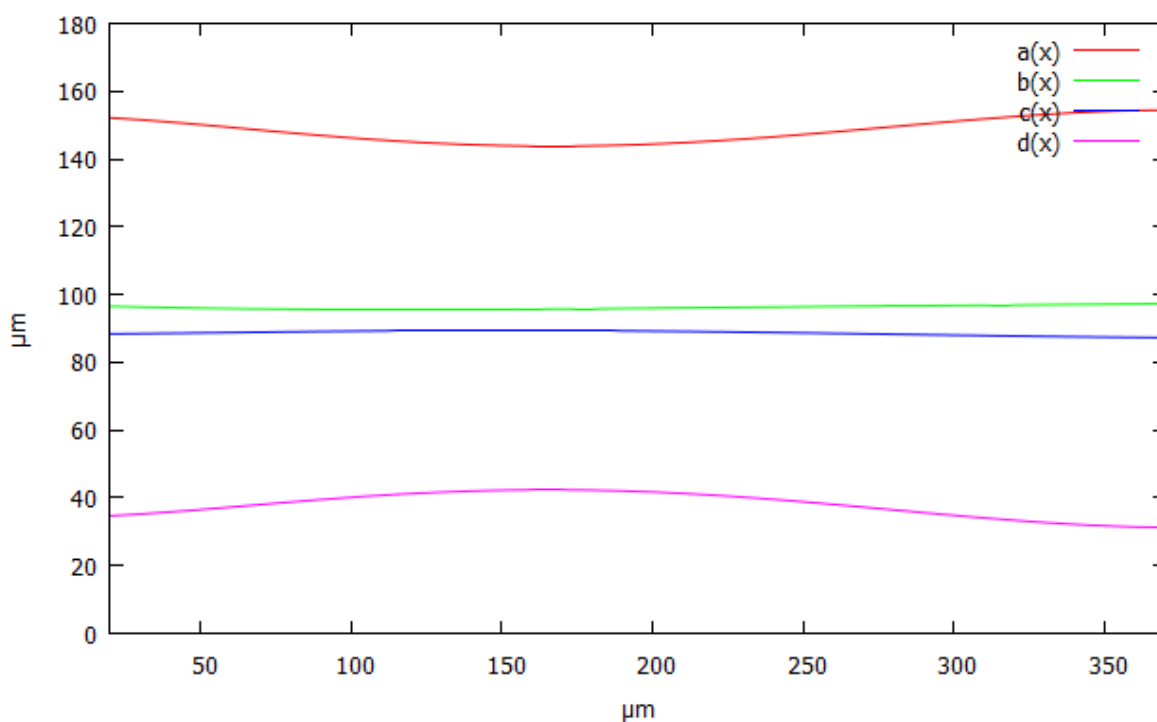
- Rovnice popisující křivky taperovaného jednovidového vlákna č. 9:

$$\begin{aligned} a(x) = & 9,70139806261739 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 - 1,65440932403893 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 \\ & + 8,12989127137551 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,00118786307541783 \cdot x^2 \\ & - 0,0129367222305141 \cdot x + 152,847603792991 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b(x) = & 2,2323911169303 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 - 1,73971391377518 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & + 2,49931357947718 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 + 1,04215788354818 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 \\ & - 0,0255573042425386 \cdot x + 96,9907787836409 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c(x) = & -2,36740187240072 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 + 3,10903250976504 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & - 1,3221888495936 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 1,6891041396493 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 \\ & + 0,00271324950479501 \cdot x + 88,2692916988103 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d(x) = & -8,01739359007015 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 + 1,48617009290983 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 \\ & - 7,58075182243927 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 0,00113217813242967 \cdot x^2 \\ & + 0,00862830868557461 \cdot x + 33,8291106252203 \end{aligned}$$



**Obr. A.7:** Profil taperovaného jednovidového vlákna č. 9

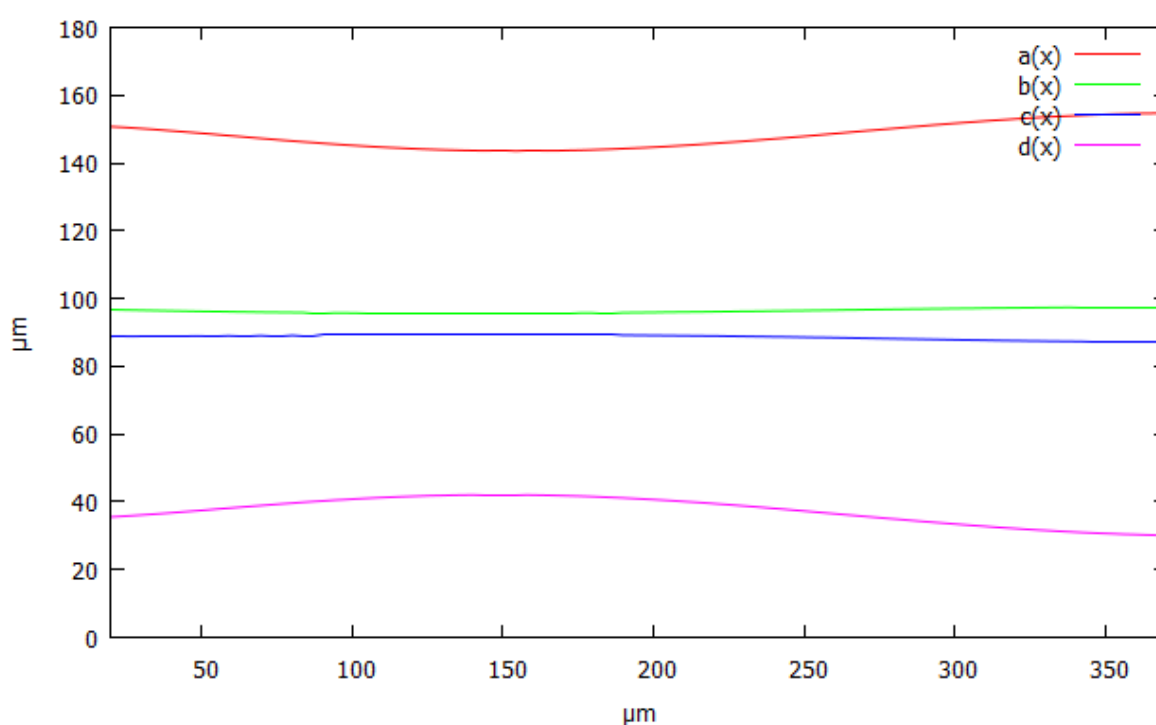
- Rovnice popisující křivky taperovaného jednovláknového vlákna č. 10:

$$\begin{aligned} a(x) = & 1,61539494409173 \cdot 10^{-11} \cdot x^5 - 2,2002761079754 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 \\ & + 9,49605746619124 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,001271543588043 \cdot x^2 \\ & - 0,00867725727108235 \cdot x + 153,154717316796 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b(x) = & -8,7528736998194 \cdot 10^{-14} \cdot x^5 - 4,13689128062711 \cdot 10^{-10} \cdot x^4 \\ & + 1,64177031443383 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 + 5,97123256762277 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 \\ & - 0,0209708321050994x \cdot x + 97,1041073795608 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c(x) = & 2,82193272081749 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 - 1,50870749366092 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & + 9,24409543516057 \cdot 10^{-8} \cdot x^3 + 6,59359821943546 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 \\ & + 0,0046476830535889 \cdot x + 88,7110308679134 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d(x) = & -1,77035849816274 \cdot 10^{-11} \cdot x^5 + 2,26206996943157 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 \\ & - 9,30893844111444 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 0,00116899830565187 \cdot x^2 \\ & + 0,0150714505463846 \cdot x + 34,8288716229303 \end{aligned}$$



**Obr. A.8:** Profil taperovaného jednovláknového vlákna č. 10



- 
- **Kontrolní body pro jednovířová taperovaná vlákna:**

**Tabulka č. A.1:** Naměřené hodnoty funkcí v kontrolních bodech vzorku 3

<b>Vzorek 3</b>	<b>a(x)</b>	<b>b(x)</b>	<b>c(x)</b>	<b>d(x)</b>
<b>100</b>	145,2046	95,88106	89,53165	40,41969
<b>150</b>	143,2682	95,65676	89,66345	42,20323
<b>175</b>	143,414	95,74503	89,59505	41,97958
<b>200</b>	144,2679	95,94846	89,43212	41,03006
<b>250</b>	147,527	96,56717	88,86025	37,50235

**Tabulka č. A.2:** Naměřené hodnoty funkcí v kontrolních bodech vzorku 4

<b>Vzorek 4</b>	<b>a(x)</b>	<b>b(x)</b>	<b>c(x)</b>	<b>d(x)</b>
<b>100</b>	145,631	96,20809	89,12544	39,76111
<b>150</b>	143,3508	95,9395	89,34429	41,97169
<b>175</b>	143,2562	95,99084	89,33863	42,07287
<b>200</b>	143,8819	96,16453	89,24482	41,4741
<b>250</b>	146,9001	96,80059	88,79169	38,51707

**Tabulka č. A.3:** Naměřené hodnoty funkcí v kontrolních bodech vzorku 5

<b>Vzorek 5</b>	<b>a(x)</b>	<b>b(x)</b>	<b>c(x)</b>	<b>d(x)</b>
<b>100</b>	146,2223	95,74102	89,50981	39,68796
<b>150</b>	143,8373	95,55248	89,65642	41,89283
<b>175</b>	143,6152	95,55375	89,69601	42,10908
<b>200</b>	144,0826	95,63034	89,68263	41,67961
<b>250</b>	146,7533	96,0264	89,3974	39,13352

**Tabulka č. A.4:** Naměřené hodnoty funkcí v kontrolních bodech vzorku 6

<b>Vzorek 6</b>	<b>a(x)</b>	<b>b(x)</b>	<b>c(x)</b>	<b>d(x)</b>
<b>100</b>	146,2585	96,08412	89,38898	39,2387
<b>150</b>	143,8459	95,76598	89,63634	41,74385
<b>175</b>	143,5978	95,78028	89,60218	41,93041
<b>200</b>	144,0545	95,91053	89,47192	41,3439
<b>250</b>	146,836	96,45594	88,9979	38,21144

---

**Tabulka č. A.5:** Naměřené hodnoty funkcí v kontrolních bodech vzorku 7

Vzorek 7	a(x)	b(x)	c(x)	d(x)
100	146,1397	95,70717	89,21334	39,42797
150	143,5255	95,46709	89,59638	41,80594
175	143,1478	95,44364	89,56905	42,08409
200	143,4598	95,49322	89,41053	41,6868
250	145,9285	95,82541	88,85714	39,08993

**Tabulka č. A.6:** Naměřené hodnoty funkcí v kontrolních bodech vzorku 8

Vzorek 8	a(x)	b(x)	c(x)	d(x)
100	145,1996	95,79562	90,28651	40,57848
150	143,3757	95,60597	89,62937	42,48333
175	143,4635	95,68306	89,05311	42,38445
200	144,2076	95,85553	88,38227	41,5693
250	147,2273	96,36793	86,98876	38,24263

**Tabulka č. A.7:** Naměřené hodnoty funkcí v kontrolních bodech vzorku 9

Vzorek 9	a(x)	b(x)	c(x)	d(x)
100	146,2478	95,57549	89,19476	40,13897
150	143,9798	95,63435	89,40855	42,22724
175	143,8523	95,78408	89,35825	42,30668
200	144,4188	95,97822	89,20773	41,70904
250	147,2502	96,40443	88,67805	38,82211

**Tabulka č. A.8:** Naměřené hodnoty funkcí v kontrolních bodech vzorku 10

Vzorek 10	a(x)	b(x)	c(x)	d(x)
100	145,2186	95,72608	89,21152	40,8021
150	143,5701	95,64003	89,31903	42,08175
175	143,793	95,74043	89,26989	41,68689
200	144,6806	95,92194	89,13293	40,65956
250	147,9066	96,45724	88,59185	37,28042

---

## Příloha B Geometrie na kónických zakončeních mnohovidových vláken

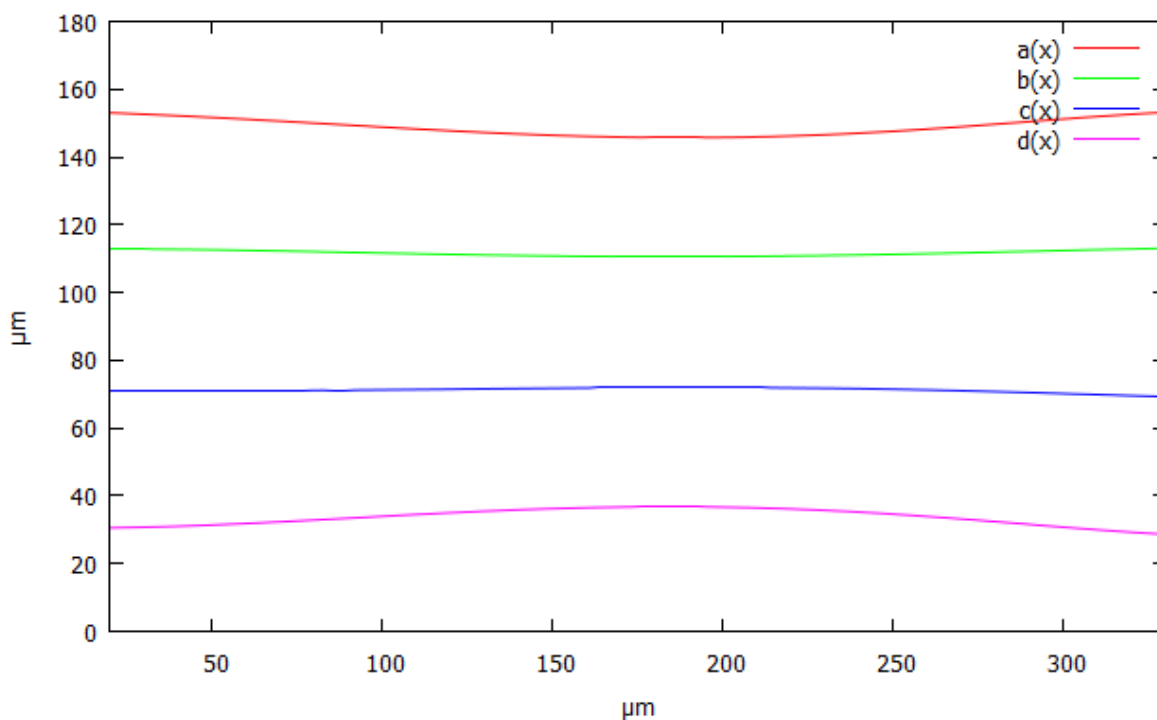
- Rovnice popisující křivky taperovaného mnohovidového vlákna č. 3:

$$\begin{aligned}a(x) = & -1,99490421621732 \cdot 10^{-11} \cdot x^5 + 1,07206906698993 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 \\ & - 3,31162625863406 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 - 0,000261405022929222 \cdot x^2 \\ & - 0,0279843666815538 \cdot x + 151,71850697604\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}b(x) = & 2,00757827826166 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 - 4,62026855138123 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & + 2,73473908055708 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 5,29754579417843 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 \\ & + 0,0256119270290037 \cdot x + 112,5962527806\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}c(x) = & 1,0162900760899 \cdot 10^{-11} \cdot x^5 - 7,57268106864827 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & + 1,52596455435962 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,0000604223329795916 \cdot x^2 \\ & + 0,000245112435658326 \cdot x + 74,9840040670576\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}d(x) = & 1,33582335293822 \cdot 10^{-11} \cdot x^5 - 3,97238875305658 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & - 228148098417072 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 7,29184445127741 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 \\ & - 0,0136742964888973 \cdot x + 34,5570611747153\end{aligned}$$



Obr. B.1: Profil taperovaného mnohovidového vlákna č. 3

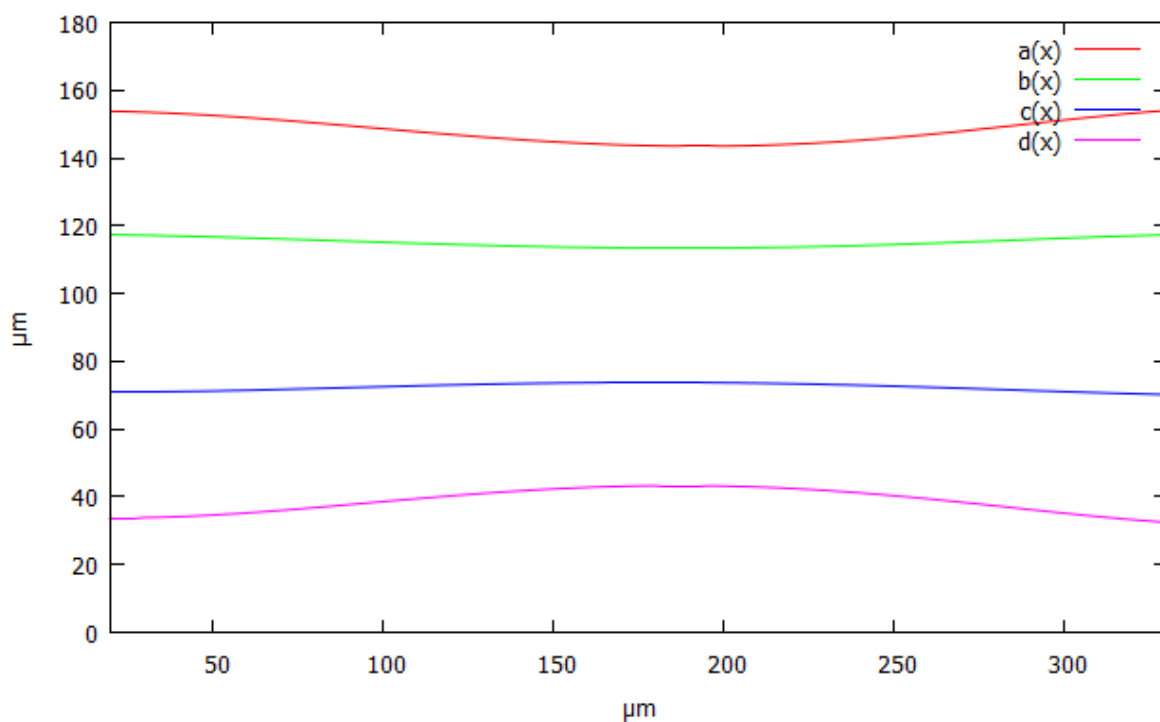
- Rovnice popisující křivky taperovaného mnohovidového vlákna č. 4:

$$\begin{aligned} a(x) = & -2,14095448322736 \cdot 10^{-11} \cdot x^5 + 1,0666999945796 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 \\ & + 2,14095448322736 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,000999995919555427 \cdot x^2 \\ & + 0,0186698162807216 \cdot x + 153,821045233573 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b(x) = & -7,59578000659622 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 + 2,45989125709293 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & - 1,06484361685551 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 341550881128065 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 \\ & - 0,00223710530888991 \cdot x + 114,0425352004 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c(x) = & -1,89237832505297 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 + 5,86301384176524 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & - 3,66777999452222 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 0,000715587331682028 \cdot x^2 \\ & + 0,0283825993445292 \cdot x + 71,2928125588683 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d(x) = & 9,39278119887539 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 + 5,23854348727103 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & - 7,68499189534563 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 0,0018266214057323 \cdot x^2 \\ & - 0,0718232815696766 \cdot x + 32,5675667151671 \end{aligned}$$



**Obr. B.2:** Profil taperovaného mnohovidového vlákna č. 4

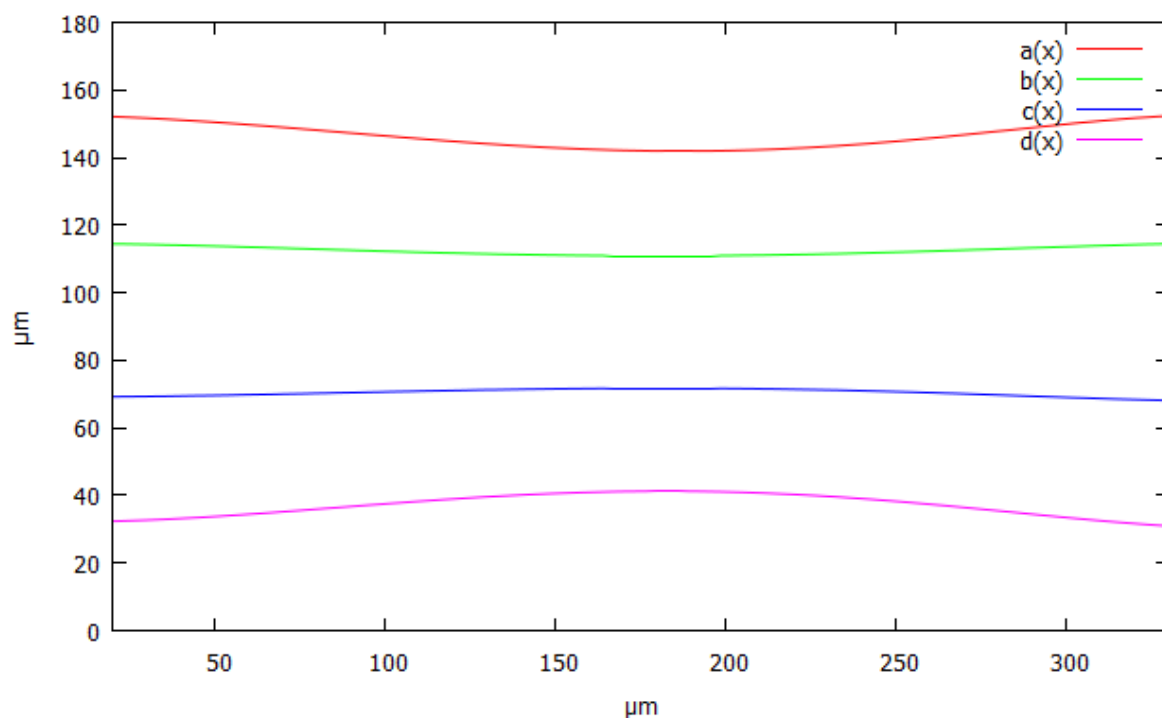
- Rovnice popisující křivky taperovaného mnohovidového vlákna č. 5:

$$\begin{aligned} a(x) = & -2,69644158993751 \cdot 10^{-11} \cdot x^5 + 1,19990371465812 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 \\ & + 1,27409228652758 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,000726105219918432 \cdot x^2 \\ & + 0,0115007717165863 \cdot x + 153,62629914132 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b(x) = & -8,36581074810193 \cdot 10^{-13} \cdot x^5 - 2,99131830365519 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & + 2,4824321998016 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 4,718390368728084 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 \\ & + 0,00248970181933111 \cdot x + 113,573630979556 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c(x) = & 7,74035025470972 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 - 3,69586864019963 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & - 2,2614773969505 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 + 0,000181557207749622 \cdot x^2 \\ & + 0,00285036667847179 \cdot x + 72,0756622395095 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d(x) = & 1,21443743083719 \cdot 10^{-11} \cdot x^5 - 3,56729495083125 \cdot 10^{-11} \cdot x^4 \\ & - 4,57184533198343 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 0,00110406007413342 \cdot x^2 \\ & - 0,0130193206162407 \cdot x + 32,2348894252684 \end{aligned}$$



**Obr. B.3:** Profil taperovaného mnohovidového vlákna č. 5

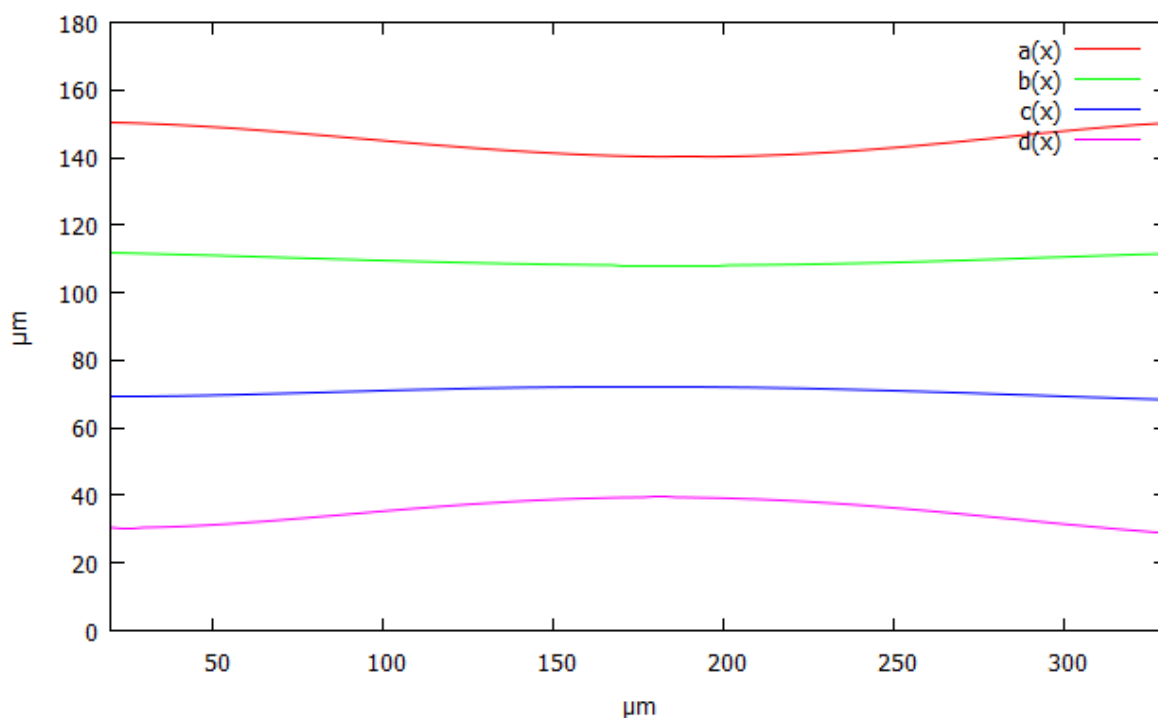
- Rovnice popisující křivky taperovaného mnohovidového vlákna č. 6:

$$\begin{aligned} a(x) = & -2,13503977366709 \cdot 10^{-11} \cdot x^5 + 6,26027675899547 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & + 3,51668607000865 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,00114039854612959 \cdot x^2 \\ & + 0,021075664399365 \cdot x + 152,882459879302 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b(x) = & -4,26661439672709 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 + 9,32025407308693 \cdot 10^{-10} \cdot x^4 \\ & + 9,32341440592146 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 - 2,16852695887941 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 \\ & - 0,0148287795835536 \cdot x + 114,201564757398 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c(x) = & 5,56434336404194 \cdot 10^{-12} \cdot x^5 + 8,75885092952511 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 \\ & - 442205741237208 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 0,000776994604268465 \cdot x^2 \\ & - 0,0273227563302472 \cdot x + 71,5750640559252 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d(x) = & -1,00407425501192 \cdot 10^{-11} \cdot x^5 + 2,15665822498995 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 \\ & - 1,23573599827143 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 + 0,00234952128003564 \cdot x^2 \\ & - 0,0936160788015829 \cdot x + 33,5131656362202 \end{aligned}$$



**Obr. B.4:** Profil taperovaného mnohovidového vlákna č. 6

- 
- **Kontrolní body pro mnohovidová taperovaná vlákna:**

**Tabulka č. B.1:** Naměřené hodnoty funkcí v kontrolních bodech vzorku 3

<b>Vzorek 3</b>	<b>a(x)</b>	<b>b(x)</b>	<b>c(x)</b>	<b>d(x)</b>
<b>100</b>	146,8474	111,6549	75,27462	37,93634
<b>150</b>	144,434	110,815	75,74947	40,21594
<b>175</b>	143,8215	110,6361	75,92038	40,73485
<b>200</b>	143,7855	110,6607	75,95969	40,65654
<b>250</b>	145,6064	111,2879	75,456	38,59238

**Tabulka č. B.2:** Naměřené hodnoty funkcí v kontrolních bodech vzorku 4

<b>Vzorek 4</b>	<b>a(x)</b>	<b>b(x)</b>	<b>c(x)</b>	<b>d(x)</b>
<b>100</b>	148,6388	111,6382	72,51002	36,58424
<b>150</b>	144,7968	111,6382	73,58183	40,32149
<b>175</b>	143,7259	109,9583	73,77198	41,20685
<b>200</b>	143,5299	109,957	73,67281	41,17519
<b>250</b>	146,0235	110,9657	72,66668	38,33328

**Tabulka č. B.3:** Naměřené hodnoty funkcí v kontrolních bodech vzorku 5

<b>Vzorek 5</b>	<b>a(x)</b>	<b>b(x)</b>	<b>c(x)</b>	<b>d(x)</b>
<b>100</b>	147,4195	111,2791	73,65794	37,51959
<b>150</b>	143,8908	110,131	74,54176	40,59752
<b>175</b>	143,0331	109,9207	74,72677	41,22592
<b>200</b>	143,0445	110,0037	74,66236	41,04779
<b>250</b>	145,816	110,9923	73,72397	38,26912

**Tabulka č. B.4:** Naměřené hodnoty funkcí v kontrolních bodech vzorku 6

<b>Vzorek 6</b>	<b>a(x)</b>	<b>b(x)</b>	<b>c(x)</b>	<b>d(x)</b>
<b>100</b>	147,5153	111,533	73,01092	37,34566
<b>150</b>	143,8016	110,3926	74,04621	40,78451
<b>175</b>	142,8604	110,136	74,19114	41,43581
<b>200</b>	142,7995	110,1464	74,04741	41,20542
<b>250</b>	145,4289	110,983	72,99222	38,30953

## Příloha C Útlum na jednovidových vláknech

**Tab. C.1:** Hodnoty útlumu měřených na jednovidových vláknech č. 3 a 4

PROFIL 3	A (dB)	
Měření	$\lambda = 1310 \text{ nm}$	$\lambda = 1550 \text{ nm}$
1	0,31	0,28
2	0,34	0,23
3	0,32	0,31
4	0,31	0,27
5	0,27	0,32
6	0,29	0,22
7	0,31	0,21
8	0,33	0,24
9	0,34	0,25
10	0,32	0,24
Průměr	0,314	0,257

PROFIL 4	A (dB)	
Měření	$\lambda = 1310 \text{ nm}$	$\lambda = 1550 \text{ nm}$
1	0,36	0,31
2	0,29	0,28
3	0,31	0,29
4	0,35	0,32
5	0,29	0,27
6	0,31	0,28
7	0,29	0,27
8	0,31	0,31
9	0,28	0,27
10	0,29	0,28
Průměr	0,308	0,288

**Tab. C.2:** Hodnoty útlumu měřených na jednovidových vláknech č. 5 a 6

PROFIL 5	A (dB)	
Měření	$\lambda = 1310 \text{ nm}$	$\lambda = 1550 \text{ nm}$
1	0,35	0,34
2	0,33	0,31
3	0,34	0,32
4	0,29	0,29
5	0,31	0,27
6	0,32	0,31
7	0,34	0,28
8	0,32	0,32
9	0,34	0,29
10	0,33	0,32
Průměr	0,327	0,305

PROFIL 6	A (dB)	
Měření	$\lambda = 1310 \text{ nm}$	$\lambda = 1550 \text{ nm}$
1	0,26	0,24
2	0,28	0,26
3	0,27	0,25
4	0,33	0,29
5	0,31	0,28
6	0,29	0,28
7	0,31	0,31
8	0,31	0,29
9	0,29	0,25
10	0,28	0,27
Průměr	0,293	0,272



**Tab. C.3:** Hodnoty útlumu měřených na jednovidových vláknech č. 7 a 8

PROFIL 7	A (dB)		PROFIL 8	A (dB)	
	λ = 1310 nm	λ = 1550 nm		λ = 1310 nm	λ = 1550 nm
1	0,36	0,32	1	0,34	0,29
2	0,35	0,31	2	0,35	0,28
3	0,36	0,27	3	0,31	0,29
4	0,33	0,29	4	0,33	0,32
5	0,29	0,25	5	0,36	0,32
6	0,33	0,26	6	0,35	0,28
7	0,32	0,31	7	0,31	0,29
8	0,29	0,32	8	0,28	0,31
9	0,37	0,27	9	0,29	0,27
10	0,36	0,29	10	0,28	0,28
Průměr	0,336	0,289	Průměr	0,32	0,293

**Tab. C.4:** Hodnoty útlumu měřených na jednovidových vláknech č. 9 a 10

PROFIL 9	A (dB)		PROFIL 10	A (dB)	
	λ = 1310 nm	λ = 1550 nm		λ = 1310 nm	λ = 1550 nm
1	0,36	0,34	1	0,33	0,24
2	0,36	0,35	2	0,35	0,26
3	0,37	0,31	3	0,34	0,28
4	0,34	0,29	4	0,34	0,27
5	0,36	0,28	5	0,32	0,28
6	0,31	0,31	6	0,28	0,31
7	0,35	0,34	7	0,29	0,32
8	0,34	0,33	8	0,27	0,32
9	0,36	0,37	9	0,3	0,27
10	0,38	0,34	10	0,31	0,28
Průměr	0,353	0,326	Průměr	0,313	0,283

## Příloha D Útlum na mnohovidových vláknech

**Tab. D.1:** Hodnoty útlumu měřených na mnohovidových vláknech č. 3 a 4

PROFIL 3	A (dB)	
Měření	$\lambda = 850 \text{ nm}$	$\lambda = 1300 \text{ nm}$
1	0,68	0,44
2	0,67	0,46
3	0,72	0,48
4	0,69	0,51
5	0,73	0,48
6	0,71	0,46
7	0,69	0,43
8	0,76	0,48
9	0,74	0,45
10	0,77	0,47
Průměr	0,716	0,466

PROFIL 4	A (dB)	
Měření	$\lambda = 850 \text{ nm}$	$\lambda = 1300 \text{ nm}$
1	0,59	0,46
2	0,62	0,45
3	0,64	0,47
4	0,57	0,42
5	0,82	0,46
6	0,68	0,47
7	0,79	0,48
8	0,62	0,43
9	0,68	0,43
10	0,69	0,41
Průměr	0,67	0,448

**Tab. D.2:** Hodnoty útlumu měřených na mnohovidových vláknech č. 5 a 6

PROFIL 5	A (dB)	
Měření	$\lambda = 850 \text{ nm}$	$\lambda = 1300 \text{ nm}$
1	0,58	0,38
2	0,62	0,41
3	0,64	0,42
4	0,61	0,39
5	0,67	0,42
6	0,72	0,44
7	0,69	0,43
8	0,68	0,39
9	0,71	0,42
10	0,66	0,46
Průměr	0,658	0,416

PROFIL 6	A (dB)	
Měření	$\lambda = 850 \text{ nm}$	$\lambda = 1300 \text{ nm}$
1	0,68	0,48
2	0,76	0,53
3	0,72	0,51
4	0,69	0,49
5	0,71	0,51
6	0,73	0,52
7	0,76	0,54
8	0,69	0,46
9	0,76	0,53
10	0,78	0,56
Průměr	0,728	0,513

---

## **Příloha E      Vyhodnocení geometrických parametrů jednovíkových vláken**

**Tabulka č. E.1:** Průměrné hodnoty funkcí a jejich odchylka v bodě  $x=150$

<b>Vzorek</b>	<b>a(x)</b>	<b>b(x)</b>	<b>c(x)</b>	<b>d(x)</b>
<b>1</b>	144,0197	95,50382	89,49178	41,88418
<b>2</b>	143,7071	95,77104	89,6137	41,55915
<b>3</b>	143,2682	95,65676	89,66345	42,20323
<b>4</b>	143,3508	95,9395	89,34429	41,97169
<b>5</b>	143,8373	95,55248	89,65642	41,89283
<b>6</b>	143,8459	95,76598	89,63634	42,14385
<b>7</b>	143,5255	95,46709	89,59638	41,80594
<b>8</b>	143,3757	95,60597	89,62937	42,48333
<b>9</b>	143,9798	95,63435	89,40855	41,92724
<b>10</b>	143,5701	95,64003	89,31903	42,08175

<b>Průměrná hodnota</b>	143,648	95,6537	89,53593	41,99532
<b>Směrodatná odchylka</b>	$\pm 0,255836$	$\pm 0,133581$	$\pm 0,12698$	$\pm 0,23771$

**Tabulka č. E.2:** Průměrné hodnoty funkcí a jejich odchylka v bodě  $x=175$

<b>Vzorek</b>	<b>a(x)</b>	<b>b(x)</b>	<b>c(x)</b>	<b>d(x)</b>
<b>1</b>	143,8074	95,55173	89,45373	42,06019
<b>2</b>	143,4327	95,76568	89,5897	41,84732
<b>3</b>	143,414	95,74503	89,59505	41,97958
<b>4</b>	143,2562	95,99084	89,33863	42,07287
<b>5</b>	143,6152	95,55375	89,69601	42,10908
<b>6</b>	143,5978	95,78028	89,60218	42,33041
<b>7</b>	143,1478	95,44364	89,56905	42,08409
<b>8</b>	143,4635	95,68306	89,05311	42,38445
<b>9</b>	143,8523	95,78408	89,35825	42,00668
<b>10</b>	143,793	95,74043	89,26989	41,68689

<b>Průměrná hodnota</b>	143,538	95,70385	89,45256	42,05615
<b>Směrodatná odchylka</b>	$\pm 0,22574$	$\pm 0,146734$	$\pm 0,186853$	$\pm 0,193686$

**Tabulka č. E.3:** Průměrné hodnoty funkcí a jejich odchylka v bodě  $x=200$

Vzorek	a(x)	b(x)	c(x)	d(x)
1	144,2767	95,69723	89,34114	41,56237
2	143,8295	95,83999	89,44843	41,45794
3	144,2679	95,94846	89,43212	41,03006
4	143,8819	96,16453	89,24482	41,4741
5	144,0826	95,63034	89,68263	41,67961
6	144,0545	95,91053	89,47192	41,7439
7	143,4598	95,49322	89,41053	41,6868
8	144,2076	95,85553	88,38227	41,5693
9	144,4188	95,97822	89,20773	41,40904
10	144,6806	95,92194	89,13293	40,65956

<b>Průměrná hodnota</b>	144,116	95,844	89,27545	41,42727
<b>Směrodatná odchylka</b>	$\pm 0,322511$	$\pm 0,182361$	$\pm 0,33242$	$\pm 0,319426$

**Tabulka č. E.4:** Průměrné hodnoty funkcí a jejich odchylka v bodě  $x=250$

Vzorek	a(x)	b(x)	c(x)	d(x)
1	146,9442	96,16833	88,92295	38,80534
2	146,3343	96,21716	88,92333	38,8227
3	147,527	96,56717	88,86025	37,50235
4	146,9001	96,80059	88,79169	38,51707
5	146,7533	96,0264	89,3974	39,13352
6	146,836	96,45594	88,9979	38,61144
7	145,9285	95,82541	88,85714	39,08993
8	147,2273	96,36793	86,98876	38,24263
9	147,2502	96,40443	88,67805	38,52211
10	147,9066	96,45724	88,59185	37,28042

<b>Průměrná hodnota</b>	146,9607	96,32906	88,70093	38,45275
<b>Směrodatná odchylka</b>	$\pm 0,537642$	$\pm 0,265023$	$\pm 0,606135$	$\pm 0,590468$

Tabulka F.1: Průměrné hodnoty funkcí a jejich odchylka v bodě  $x=150$ 

Vzorek	a(x)	b(x)	c(x)	d(x)
1	144,5774	109,6048	75,5235	40,55763
2	144,7214	109,7712	74,25937	40,12055
3	144,434	110,815	75,74947	40,21594
4	144,7968	111,6382	73,58183	40,32149
5	143,8908	110,131	74,54176	40,59752
6	143,8016	110,3926	74,04621	40,78451

Průměr	144,3704	110,3921	74,61702	40,43294
Směrodatná	0,388484	0,683748	0,778373	0,232139

Tabulka F.2: Průměrné hodnoty funkcí a jejich odchylka v bodě  $x=175$ 

Vzorek	a(x)	b(x)	c(x)	d(x)
1	143,7242	109,3356	75,74264	41,54627
2	143,5573	109,5225	74,47477	40,95413
3	143,8215	110,6361	75,92038	40,73485
4	143,7259	109,9583	73,77198	41,20685
5	143,0331	109,9207	74,72677	41,22592
6	142,8604	110,136	74,19114	41,43581

Průměr	143,4537	109,9182	74,80461	41,18397
Směrodatná	0,370166	0,420411	0,783407	0,274319

---

**Tabulka F.3:** Průměrné hodnoty funkcí a jejich odchylka v bodě  $x=200$

Vzorek	a(x)	b(x)	c(x)	d(x)
1	143,6623	109,3407	75,70791	41,66266
2	143,4129	109,6842	74,37287	40,79318
3	143,7855	110,6607	75,95969	40,65654
4	143,5299	109,957	73,67281	41,17519
5	143,0445	110,0037	74,66236	41,04779
6	142,7995	110,1464	74,04741	41,20542

Průměr	143,3724	109,9654	74,73717	41,09013
Směrodatná	0,345677	0,405609	0,835049	0,32308

**Tabulka F.4:** Průměrné hodnoty funkcí a jejich odchylka v bodě  $x=250$

Vzorek	a(x)	b(x)	c(x)	d(x)
1	146,0064	110,2287	74,8087	38,88185
2	146,5068	111,0219	73,23573	37,5014
3	145,6064	111,2879	75,456	38,59238
4	146,0235	110,9657	72,66668	38,33328
5	145,816	110,9923	73,72397	38,26912
6	145,4289	110,983	72,99222	38,30953

Průměr	145,898	110,9133	73,81388	38,31459
Směrodatná	0,343975	0,325249	1,001647	0,420846